



**Martinho António Santos  
Martins**

**Avaliação de dois tratamentos na redução da erosão do  
solo após fogo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica de Jan Jacob Keizer, Ph.D. e co-orientação de Maria Eufemia Valera Teijeiro, Ph.D. investigadores do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Tese desenvolvida no âmbito do projeto FIRECNUTS (PTDC/AGRCFL/104559/2008), com apoio financeiro da FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) e com cofinanciamento pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE – Programa Operacional Factores de Competitividade (POFC).

Ao meu pai e á minha mãe que nunca me faltaram...

**o júri**

**presidente**

**Prof.<sup>a</sup> Doutora Celeste de Oliveira Alves Coelho**

Prof.<sup>a</sup> Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António José Dinis Ferreira**

Prof. Adjunto do Departamento de Ciências Exatas e do Ambiente da Escola Superior Agrária de Coimbra

**Doutor Jan Jacob Keizer**

Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Dep. de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Doutora Maria Eufémia Varela Teijeiro**

Estagiária de Pós-doutoramento do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Dep. de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Agradeço especialmente o apoio financeiro do projeto FIRECNUTS (PTDC/AGRCFL/104559/2008) e do programa de Doutoramento de Sérgio Prats Alegre (SFRH/BD/33392/2008), sem eles este estudo não seria realizado.

Aos meus pais que sempre estiveram disponíveis para me apoiar em tudo.

À Isabel que sempre esteve lá, nas madrugadas sem fim, nas discussões e opiniões, nas correções, pela força que sempre me deu e paciência.

Agradeço em especial ao Sérgio, pela orientação, paciência e apoio incondicional do início ao fim do trabalho realizado.

À Sílvia pela disponibilidade e orientação nas análises de laboratório. À Margarida e Renata pela ajuda incondicional nas análises de laboratório, comentários e opiniões. À Diana, Maruxa e João Pedro pela disponibilidade, dicas, conhecimentos e paciência. Ao Prof. Nelson pelos conhecimentos de SPSS. Ao Martinho e Jorge pelos conhecimentos de AutoCAD e Photoshop.

Ao orientador Jan Jacob Keizer pelas oportunidades dadas, confiança e auxílio ao longo desta dissertação

## Palavras chave

“mulching” ; PAM ; erosão do solo ; escorrência ; incêndios florestais

## Resumo

Portugal sofre todos os anos inúmeros incêndios florestais, provocando frequentemente aumentos do escoamento superficial e erosão nas áreas afectadas. O tratamento de estabilização com “mulching” tem sido apontado por vários estudos, nomeadamente estrangeiros, como uma das melhores técnicas para mitigar estes impactos.

Este estudo avalia a efetividade de um tratamento com “mulching” e de outro tratamento inovador com poliacrilamidas aniónicas na redução de escorrência e perda de sedimentos num eucaliptal após incêndio no centro norte de Portugal. A avaliação é feita a duas escalas espaciais, sendo o enfoque desta tese na escala de microparcela ( $0,24\text{m}^2$ ) mas abordado também a escala de encosta ( $100\text{m}^2$ ). Na escala de microparcela foram instaladas 12 parcelas, sendo destas, 4 de controlo (não tratado), 4 com “mulching” e 4 com poliacrilamida. Na escala de encosta foram instaladas 3 parcelas de controlo e 3 com “mulching”.

Durante o primeiro ano de monitorização, com uma precipitação de 1442 mm, as parcelas de controlo (não tratado) apresentaram em média um coeficiente de escorrência de 45% na pequena escala e 2,5% na escala de encosta, e uma perda de sedimentos de  $7,8\text{ Mg ha}^{-1}$  e  $0,81\text{ Mg ha}^{-1}$  respectivamente.

O tratamento com “mulching” composto de casca de eucalipto, aplicado a uma taxa de  $13,6\text{ Mg ha}^{-1}$  com um coberto do solo de 80%, reduziu a escorrência em 55% e a perda de sedimentos em 90%, tanto à escala das microparcelas como à escala de encosta. O tratamento com poliacrilamidas anionicas, aplicado apenas na pequena escala a uma taxa de  $0,05\text{ Mg ha}^{-1}$ , reduziu a escorrência em 20% mas não alterou a perda de sedimentos.

A dimensão das parcelas e, no caso das microparcelas, a sua posição na encosta revelaram-se factores importantes do ponto de vista dos processos hidrológicos e erosivos. Estes resultados ajudaram ainda a clarificar o conhecimento da conectividade hidrológica em encostas ardidas, e a importância da severidade do incêndio e do coberto do solo.

**Keywords**

“mulching” ; PAM ; erosão do solo ; escorrência ; incêndios florestais

**Abstract**

Portugal suffers every year from many wildfires causing increased superficial runoff and erosion in the affected areas. The post-fire stabilization treatments with “mulching” have been appointed by many authors as one of the better techniques to relieve these impacts.

This study evaluates the effectiveness of one treatment with “mulching” and another treatment with anionic polyacilamide in reducing overland flow and erosion in a eucalyptus forest after fire in northern central Portugal. The assessment is made in two spatial scales, being the focus of this thesis in the range of micro-plots (0.24 m<sup>2</sup>) but also addressed the slope scale (100m<sup>2</sup>). At micro-plot scale were installed 12 plots, four control (untreated), 4 with "mulching" and 4 with polyacrylamide. At slope scale were installed 3 control plots and 3 plots with "mulching".

After the first year the mean precipitation was 1442 mm, the control plots show 45% of runoff coefficient in the small scale and 2,5% in the slope scale and obtained 7,8 Mg ha<sup>-1</sup> and 0,81 Mg ha<sup>-1</sup> of sediment loss respectively.

The treatment with chopped bark “mulching”, applied with a rate of 13,6 Mg ha<sup>-1</sup> with 80% of soil cover, reduced runoff in 55% and sediment loss in 90% in the two scales. The other treatment with anionic polyacrylamide only applied in micro-plots scale with a rate of 0,05 Mg ha<sup>-1</sup>, reduced runoff in 20% but was not effective in reducing sediment losses.

Plot size and, in the case of micro-plot, the position on the slope proved to be important factors in the hydrological and erosive response. These results help to clarify the hydrologic connectivity knowledge in burned slopes, the role of fire intensity and ground cover.

## ÍNDICE

Índice de figuras .....	ii
Índice de tabelas .....	iii
Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1    Enquadramento.....	2
1.2    Tratamentos ao solo após incêndios florestais.....	3
1.2.1    Factores a considerar na escolha de um tratamento de estabilização .....	3
1.2.2    Tipos de tratamento de estabilização mais utilizados após incendio florestal .....	6
1.2.3    Tratamentos de estabilização ao solo com “mulching” .....	9
1.2.4    Tratamentos de estabilização ao solo com Poliacrilamidas.....	13
1.3    Objetivos e estrutura da dissertação .....	14
Capítulo 2 – Avaliação da efetividade de dois tratamentos na redução da erosão hídrica do solo após fogo.....	17
2.1    Resumo.....	18
2.2    Introdução .....	20
2.3    Materiais e Métodos.....	21
2.3.1    Área de Estudo .....	21
2.3.2    Desenho Experimental .....	23
2.3.3    Recolha de amostras e análises laboratoriais.....	25
2.3.4    Análises Estatísticas.....	25
2.4    Resultados .....	26
2.4.1    Totais de Escorrência e Perda de sedimentos, e coberto do solo .....	26
2.4.2    Variação sazonal da Precipitação, escorrência e erosão .....	27
2.4.3    Variabilidade entre a base e o topo da encosta .....	32
2.4.4    Factores explicativos da escorrência e erosão .....	34
2.5    Discussão.....	39
2.6    Conclusões .....	43
Capítulo 3 – Viabilidade da aplicação dos tratamentos e Conclusões da tese .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> (Esquerda) Esquema tridimensional que ilustra a relação entre a severidade de um incêndio (alta ou baixa), eventos hidrológicos (pequenos ou grandes) e a resposta hidrológica da bacia hidrográfica. (Direita) adição de uma quarta dimensão ao esquema – Efetividade do tratamento que varia consoante a resposta hidrológica da bacia hidrográfica e do tipo de tratamento (Robichaud et al., 2010).....	5
<b>Figura 2:</b> Exemplos dos tratamentos mais comuns: (a) Vista geral de uma encosta ardida um ano após semear herbáceos (foto por: Dr. Matt Brooks). (b) Exemplo de uma barreira feita a partir de troncos do próprio local (Robichaud et al., 2010). (c) Exemplo do coberto final de uma área ardida com “mulching” de ramos e folhagem (Robichaud et al., 2010). (d) Exemplo do coberto final de uma área ardida com grãos de PAM (Davidson et al.,2009). ....	7
<b>Figura 3:</b> (a) tipos de “mulching” secos: 1 - palha; 2 - cascalho; 3 e 4 – pedras de rio; 5 – folhas de milho; 6 – caules de milho; 7 – lascas de madeira; 8 – casca de árvores; 9 – folhas de carvalho; 10-folhas de pinheiro (Smets et al., 2008). (b) Exemplo de “mulching” húmido: coberto final de uma área ardida com “hydromulch” (Robichaud et al., 2010).....	10
<b>Figura 4:</b> Esquema do funcionamento das ligações de PAM com as partículas de argila entrelaçadas com os silicatos minerais (Davidson et al.,2009). ....	13
<b>Figura 5:</b> Localização da área e do local de estudo.....	22
<b>Figura 6:</b> Esquema das parcelas de controlo e tratadas na pequena escala e escala de encosta.	23
<b>Figura 7:</b> (a) Parcelas da escala de encosta; (b) Parcelas da pequena escala; (c) Grelha de descrição de coberto na pequena escala.....	24
<b>Figura 8:</b> Precipitação e Intensidade máxima de cada período de amostragem, data de ocorrência do incêndio e aplicação dos tratamentos. ....	28
<b>Figura 9:</b> Variabilidade temporal dos valores médios de escorrência e coeficiente de escorrência nas parcelas de pequena escala e escala de encosta para todo o período de amostragem..	30
<b>Figura 10:</b> Variabilidade temporal da perda de sedimento média e taxa de erosão média nas parcelas de pequena escala e escala de encosta para todo o período de amostragem. ....	31
<b>Figura 11:</b> Variabilidade da escorrência e perda de sedimentos nas microparcels ao longo da encosta. ....	33
<b>Figura 12:</b> Relação dos valores totais de escorrência e perda de sedimentos nos quatro blocos de microparcels na encosta com os parâmetros: coberto (%) e Solo nu (%). ....	35
<b>Figura 13:</b> Relação entre as variáveis Precipitação, escorrência, Perda de Sedimentos e Intensidade máxima da chuva medida em cada uma das observações. ....	37
<b>Figura 14:</b> Efetividade dos tratamentos em relação à escorrência medida em cada uma das observações na escala de microparcela e escala de encosta.....	38



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Escorrência, coeficiente de escorrência, perdas de Sedimentos e matéria orgânica e coberto durante o primeiro ano após fogo. ....	27
<b>Tabela 2:</b> Resultados de análises de variâncias (ANOVA) de duas vias para amostras repetidas de escorrência, coeficiente de escorrência e perda de sedimentos e matéria orgânica. ....	34
<b>Tabela 3:</b> Coeficientes de correlação de Speraman entre os parâmetros Precipitação, Intensidade máxima da chuva e escorrência medida em cada uma das observações. ....	38



## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

## 1.1 ENQUADRAMENTO

Os tratamentos ao solo após incêndio florestal correspondem a intervenções de estabilização do solo com a finalidade de prevenir a erosão deste e assegurar a segurança e saúde pública reduzindo o risco de danos nas reservas de água, infraestruturas e habitats (Robichaud *et al.*, 2010).

Em Portugal este tipo de intervenções raramente foi aplicado nas ações de gestão após incêndios, no entanto este cenário está a mudar devido à implementação de medidas preconizadas na portaria 1137-B/2008 que vêm apoiar financeiramente o tratamento de encostas, linhas de água e caminhos que sejam identificados pela Autoridade Florestal Nacional (AFN) como prioritários para intervenção de estabilização após incêndio.

Portugal é caracterizado por um clima temperado com Inverno chuvoso mas um Verão muito seco e quente. A esta estação seca, alia-se a acumulação de biomassa florestal, atribuída ao abandono das terras agrícolas e florestais, (Ferreira *et al.*, 2005) que tem contribuído para o aumento do número e magnitude dos incêndios florestais. Os seus efeitos no solo e vegetação têm sido bastante estudados em Portugal nas últimas duas décadas (Coelho *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2005; Keizer *et al.*, 2008; Malvar *et al.*, 2011). No entanto a aplicação de tratamentos de estabilização ao solo após incêndio encontra-se ainda pouco estudada em Portugal, (Shakesby *et al.*, 1996; Prats *et al.*, 2012).

Nos anos 90 o projeto IBERLIM (“Land management practice and erosion limitation in contrasting wildfire and gullied locations in the Iberian Peninsula”) EV5V-0041, tornou-se na primeira experiência de tratamento de estabilização do solo após incêndio em Portugal. Nesse estudo foram avaliados dois tratamentos distintos, um com “mulching” de casca de eucalipto e outro com ramos triturados a uma escala de 16m<sup>2</sup>. No entanto, a aplicação só foi efectuada no segundo anos após o incêndio. Recentemente os projetos RECOVER (Estratégias de Remediação de Solos Imediatamente Após Incêndios Florestais) PTDC/AGR/AAM/73350/2006 e EROSFIRE II (Ferramenta SIG para conservação do solo, à escala de encostas até bacias hidrográficas, após incêndios florestais) PTDC/AGR-CFL/70968/2006, testaram tratamentos de estabilização do solo com casca de eucalipto, ramos triturados e “hydromulch” para o primeiro ano após incêndio a uma escala de 16m<sup>2</sup>.

O presente estudo representa um complemento ao projeto FIRECNUTS (Efeitos de fogos florestais na quantidade e dinâmica de carbono e nutrientes no solo e na sua exportação

por escorrência superficial) PTDC/AGR-CFL/104559/2008, com o objectivo de atender às necessidades de conhecimento da efetividade do “mulching” de casca de eucalipto a escalas inferiores e superiores a 16m<sup>2</sup> e testar um novo tratamento com poliacrilamidas aniónicas (PAM) em áreas ardidas. O desempenho destes tratamentos na redução de escorrência e erosão irá contribuir para o conhecimento das práticas e tecnologias disponíveis para estabilizar e proteger os solos imediatamente após incêndio.

## **1.2 TRATAMENTOS AO SOLO APÓS INCÊNDIOS FLORESTAIS**

### *1.2.1 FACTORES A CONSIDERAR NA ESCOLHA DE UM TRATAMENTO DE ESTABILIZAÇÃO*

A passagem de um incêndio florestal por uma encosta tem grandes implicações físicas, químicas e biológicas (Neary *et al.*, 2005). Estas implicações após o incêndio florestal, designadas por Shakesby *et al.*, (2000) de “janela de perturbação”, manifestam-se logo após o incêndio e podem manter-se entre 3 a 10 anos. Neste período, sem a intervenção humana, os solos reduzem a sua espessura, sofrem um empobrecimento em nutrientes, e em condições climáticas extremas podem ocorrer cheias, desabamentos de terras e contaminação de reservas de água, representando um perigo para a saúde e proteção civil (Ferreira *et al.*, 2008; Robichaud *et al.*, 2010). Para mitigar estes efeitos é essencial o recurso a políticas e programas no sentido de aplicar tratamentos de estabilização ao solo imediatamente após incêndio, de modo a minimizar os danos provocados pelas primeiras chuvas.

Após um incêndio florestal a amplitude da erosão observada varia consideravelmente de local para local e de incêndio para incêndio e as características ambientais e do incêndio tornam cada evento de precipitação único (Scott *et al.*, 2009). Neste sentido, é de extrema importância o conhecimento da eficiência dos diferentes tipos de tratamentos, da sua reação aos diferentes factores físicos, químicos e biológicos a que ficam sujeitos bem como da sua aplicabilidade em diferentes ambientes, tendo em conta o clima, tipo de solo, vegetação e topografia, de modo a efetuar um bom equilíbrio entre os objectivos dos tratamentos e os gastos inerentes à sua aplicação. A conjugação de todos estes factores vai determinar a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica e, consequentemente, influenciar o desempenho da aplicação de tratamentos (Figura 1). Em seguida são apresentados estes factores em pormenor, os quais foram divididos em duas categorias (factores dependentes e não dependentes do incêndio) em Robichaud *et al.*, (2010).

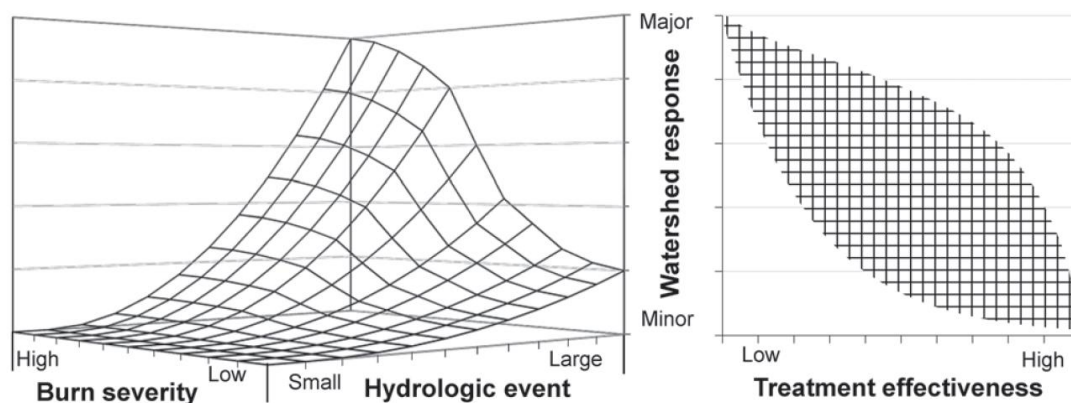
Factores não dependentes do Incêndio:

- *Características da precipitação (quantidade e intensidade)* – Estudos nos Estados Unidos que registaram tempestades rápidas com pouca quantidade de precipitação mas de grande intensidade, revelaram taxas de erosão significativas (Wagenbrenner *et al.*, 2006). Em climas onde a precipitação é menos intensa mas com grandes quantidades de chuva distribuídas ao longo do tempo revelaram igualmente taxas de erosão significativas (Fernandez *et al.*, 2011).
- *Topografia* – Geralmente as taxas de erosão aumentam com a inclinação das encostas. Também o comprimento ou a convergência de encostas pode formar escoamento superficial por raias, aumentando as taxas de erosão (Cerdà *et al.*, 1996; Smets *et al.*, 2008; Fernades *et al.*, 2010).
- *Uso do solo* – A magnitude da resposta hidrológica de um evento de precipitação numa encosta ou bacia hidrográfica está também dependente do tipo de intervenções antropológicas. O tipo de plantação, o seu corte, construções e rodovias são alguns exemplos que podem aumentar a escorrência superficial e, consequentemente, as taxas de erosão tal como demonstrado em Coelho *et al.*, (2004) para diferentes tipos de vegetação.

Factores dependentes do incêndio:

- *Severidade do incêndio* – A percentagem de combustão da vegetação após incêndio define a severidade de um incêndio. Esta circunstância pode traduzir-se num aumento de escorrência e erosão pela perda de proteção ao impacto das gotas e capacidade de reter e retardar o escoamento superficial (Bautista *et al.*, 1996; Ferreira *et al.*, 2008). Estas alterações aumentam a facilidade do escoamento superficial percorrer uma encosta e consequentemente desprender e transportar sedimentos (Shakesby, 2011).
- *Degradação do solo* – Dependendo da temperatura e duração, o incêndio provoca a destruição da matéria orgânica e deterioração da estabilidade dos agregados do solo alterando a sua porosidade e densidade, deixando o solo enfraquecido e mais susceptível a remoção (Doerr *et al.*, 2006).
- *Quantidade de solo nu* – Alguns estudos indicam que a quantidade de solo desprotegido apresenta uma forte relação com as taxas de erosão (Benavides Solorio *et al.*, 2005). A ausência de coberto vegetal aumenta as implicações no desprendimento de sedimentos uma vez que o coberto vegetal protegia o solo do impacto das gotas de chuva (Shakesby *et al.*, 2006).
- *Repelência do solo à água* – Os incêndios podem formar uma camada de solo repelente à água, que vai ter implicações na capacidade de infiltração da precipitação (Doerr *et al.*, 2006). No entanto, em zonas onde já exista esta repelência induzida por outros factores (tipo de vegetação ou períodos secos), o seu efeito não será tão importante (Keizer *et al.*, 2008; Shakesby *et al.*, 2010).

- *Tempo desde o incêndio* – As maiores quantidades de sedimentos erodidos são normalmente registadas no primeiro ano após o incêndio, decrescendo esse valor gradualmente nos anos seguintes (Robichaud *et al.*, 2008; Fernandez *et al.*, 2011).



**Figura 1:** (Esquerda) Esquema tridimensional que ilustra a relação entre a severidade de um incêndio (alta ou baixa), eventos hidrológicos (pequenos ou grandes) e a resposta hidrológica da bacia hidrográfica. (Direita) adição de uma quarta dimensão ao esquema – Efetividade do tratamento que varia consoante a resposta hidrológica da bacia hidrográfica e do tipo de tratamento (Robichaud *et al.*, 2010).

O efeito em rede de todos estes factores determina a vulnerabilidade do solo em se desprender e ser transportado (erodibilidade), paralelamente são também estes factores que introduzem ou influenciam a energia necessária ao desprendimento e movimento do solo (erosividade). O material erodido será posteriormente depositado em obstáculos que se encontrem no caminho da escorrência superficial (Scott *et al.*, 2009).

O conhecimento destas alterações na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica após um incêndio florestal é um passo determinante na escolha do tipo de intervenções a aplicar para minimizar os seus impactos, no entanto é necessário também uma adequada seleção dos locais a receber tratamentos. Nos últimos anos tem-se desenvolvido várias ferramentas para selecionar esses locais. Dado que as áreas de maior severidade têm apresentado maiores quantidades de escorrência e erosão, os mapas de severidade dos incêndios são os mais utilizados para a seleção das zonas mais vulneráveis (Benavides Solorio *et al.*, 2005). Seguidamente são aplicados modelos de previsão que têm em conta

as características climáticas e topográficas da zona selecionada, obtendo-se uma aproximação da efetividade da aplicação consoante o tipo de tratamento selecionado (Robichaud *et al.*, 2010).

Muitas vezes estas alterações hidrológicas provocadas pelos incêndios não representam uma ameaça para a segurança humana, dano para estruturas ou construções, contaminação de reservas de água ou perturbações de longa duração em habitats, pelo que é comum efetuar-se uma análise aos valores em risco para determinar se a opção pela recuperação natural (não intervir) é preferível aos ganhos gerados pela implementação de tratamentos de estabilização e recuperação (Robichaud, 2009).

Este tipo de intervenções são geralmente divididos em três categorias, estabilização de emergência, reabilitação e restauração, que diferem desde o tipo de atividades à temporização em que são executadas (Robichaud *et al.*, 2010). No presente documento iremos apenas abordar os tratamentos de estabilização de emergência.

#### 1.2.2 TIPOS DE TRATAMENTO DE ESTABILIZAÇÃO MAIS UTILIZADOS APÓS INCENDIO FLORESTAL

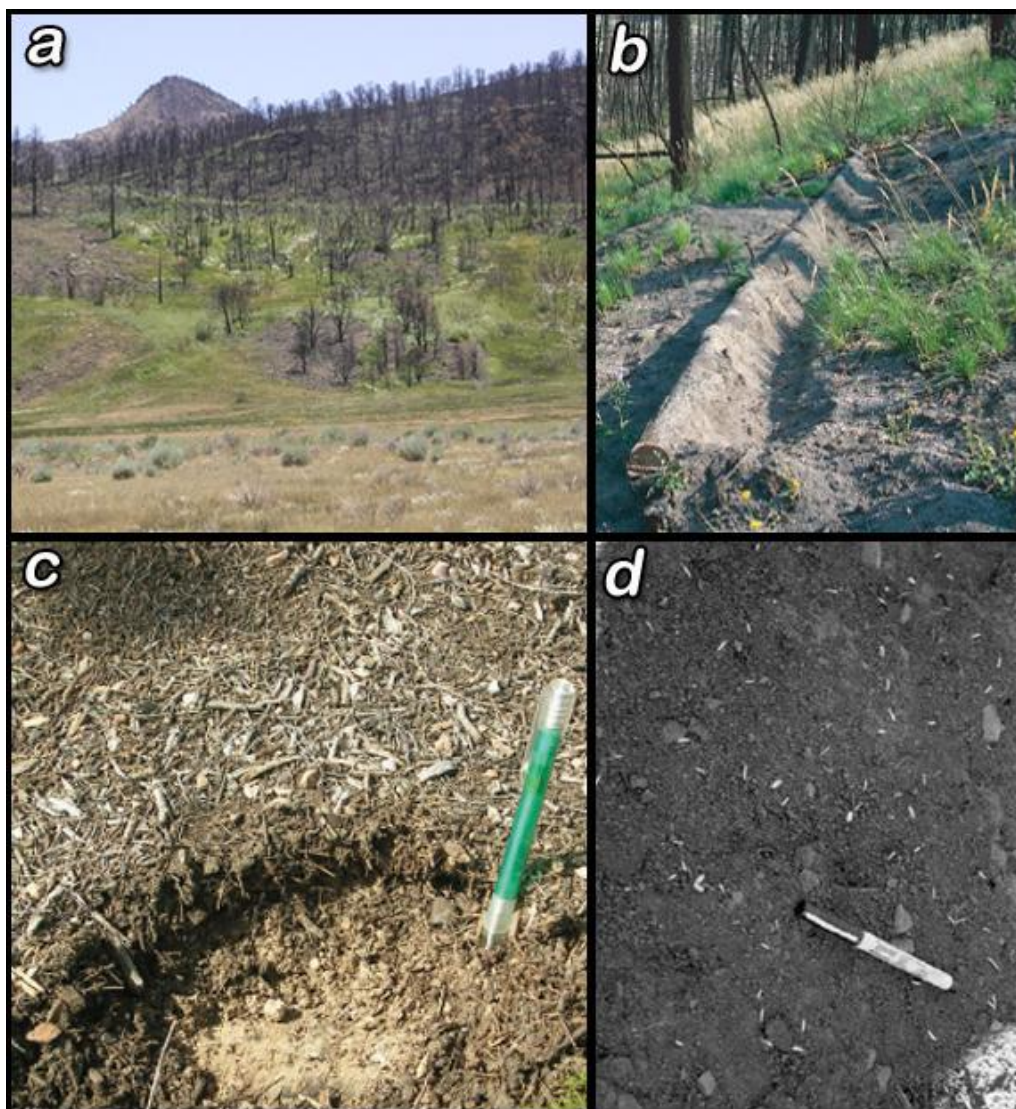
A aplicação de tratamentos de estabilização ao solo após incêndios teve o seu início na década de 1930's nos Estados Unidos. O seu principal objectivo é reduzir a escorrência superficial e atenuar a mobilização dos solos das áreas ardidas evitando a seu transporte e deposição para áreas não desejadas (Robichaud, 2009). Inicialmente estes tratamentos passavam apenas por semear grama e herbáceas nas áreas mais afectadas, mas na década de 1970's, com a formação de uma autoridade nacional para seleccionar e avaliar as áreas prioritárias, foram sendo também estudados e aplicados novos tipos de tratamento (Robichaud *et al.*, 2000).

A técnica de semear grama e herbáceas (Figura 2a), quer manualmente quer por aplicação aérea, consiste em restituir rapidamente uma camada de vegetação que proteja o solo do impacto das gotas e aumente a resistência deste à passagem de escoamento superficial (Badía *et al.*, 2000).

Os tratamentos por barreiras feitas a partir de troncos e resíduos florestais do próprio local ou com fardos de palha (Figura 2b), foram dos tratamentos mais utilizados nos últimos 30 anos. Estes consistem em construir descontinuamente nas encostas, pequenas “barragens” de modo a retardar a escorrência e fornecer uma nova zona para a



deposição e armazenamento de sedimentos arrastados (Wagenbrenner *et al.*, 2006; Robichaud *et al.*, 2008).



**Figura 2:** Exemplos dos tratamentos mais comuns: (a) Vista geral de uma encosta ardida um ano após semear herbáceos (foto por: Dr. Matt Brooks). (b) Exemplo de uma barreira feita a partir de troncos do próprio local (Robichaud *et al.*, 2010). (c) Exemplo do coberto final de uma área ardida com “mulching” de ramos e folhagem (Robichaud *et al.*, 2010). (d) Exemplo do coberto final de uma área ardida com grãos de PAM (Davidson *et al.*, 2009).

Os tratamentos com “mulching” (Figura 2c), consistem em espalhar materiais diretamente no solo, por forma a proporcionarem uma rápida cobertura sobre a superfície do solo que

o proteja do impacto das gotas e diminua a velocidade do escoamento superficial (Miles *et al.*, 1989). Começaram a ser estudados e aplicados na década de 1980's, mas só passaram a ser usados em larga escala nos últimos 10 anos (Robichaud *et al.*, 2010).

Recentemente tiveram início estudos com recurso a floculantes do solo, como por exemplo as poliacrilamias (PAM) que já tinham aplicações de sucesso em solos agrícolas, aumentando a infiltração e reduzindo a erosão (Lentz and Sojka., 2000). A sua aplicação consiste em espalhar no solo o floculante previamente dissolvido ou em forma granular (Figura 2d), com intuito de após secagem se formar uma fina camada que promove a infiltração de água e fortalecer as ligações das partículas mais finas de solo (Sojka *et al.*, 2007).

A efetividade e performance dos diferentes tratamentos apresentados têm tido resultados distintos. De facto, cada tratamento tem as suas especificidades e requisitos, o que os torna mais ou menos efetivos quando são sujeitos a diferentes climas, solos, vegetação e topografia.

A técnica de semear grama e herbáceas foi muito utilizada no passado por ser relativamente barata, fácil e rápida de implementar, no entanto apresenta alguns problemas por competir e influenciar a recuperação da vegetação nativa (Robichaud *et al.*, 2000). Por outro lado, em alguns estudos revela não adicionar grandes percentagens de coberto no primeiro ano após incêndio quando a proteção do solo é mais necessária (Badía *et al.*, 2000; Wagenbrenner *et al.*, 2006). Por todos estes motivos esta técnica é apenas atrativa em zonas onde a severidade do incêndio foi reduzida, que consequentemente terá um menor potencial erosivo (Robichaud *et al.*, 2000).

As barreiras feitas a partir de troncos e resíduos florestais são das técnicas mais utilizadas nos últimos 30 anos, em parte por não ser necessário trazer materiais de fora do local do incêndio. No entanto, a sua implementação é um processo moroso e requer bastante mão-de-obra o que a torna umas das técnicas mais caras (Miles *et al.*, 1989). Em áreas onde os troncos foram consumidos na sua totalidade são usadas barreiras de fardos de palha, que são mais rápidas de montar mas perde-se a vantagem de usar os recursos do próprio local (Robichaud *et al.*, 2010). Alguns estudos indicam que em grandes eventos de precipitação as barreiras diminuem a sua eficiência ao atingirem o limite da área de armazenamento de sedimentos (Wagenbrenner *et al.*, 2006).

A técnica de “mulching” de uma forma geral é a que apresenta as melhores taxas de efetividade, mas o seu valor varia dependendo do tipo de “mulching” aplicado. O facto de fornecer uma grande quantidade de coberto ao solo logo após a sua aplicação favorece o

seu desempenho, uma vez que a necessidade de proteção é máxima logo após o incêndio. Alguns tipos de “mulching” não têm mostrado variações da sua efetividade nos maiores eventos de precipitação nem em variações do tipo de solo ou inclinação da encosta (Fernandez *et al.*, 2011; Prats *et al.*, 2012). No entanto, dependendo do tipo de “mulching”, esta técnica pode ser cara e morosa de aplicar (Robichaud *et al.*, 2010)

A libertação de Floculantes no solo (poliacrilamidas), possui ainda poucos estudos em áreas aridas e desses somente um obteve efetividade com este tipo de tratamento. Existem múltiplas formas moleculares de poliacrilamidas e as estudadas até ao momento revelaram diferentes resultados consoante o tipo de solo (Davidson *et al.*, 2009; MacDonald *et al.*, 2009). No entanto, por ser um método fácil de implementar, extremamente barato e pelo elevado número de diferentes espécies químicas que ainda estão por estudar em áreas aridas, este tipo de tratamento é olhado com expectativa (Robichaud *et al.*, 2010).

De uma forma geral, o tratamento de estabilização com “mulching” aparenta ser o que tem menor risco de insucesso, o que o torna a melhor escolha em áreas onde os valores em risco são elevados. Ao mesmo tempo, o tratamento com poliacrilamidas ainda necessita de confirmação em relação à sua efetividade, mas existe a hipótese de vir a ser uma das novas tendências neste tipo de tratamentos.

### 1.2.3 TRATAMENTOS DE ESTABILIZAÇÃO AO SOLO COM “MULCHING”

A técnica de “mulching” teve a sua origem na agricultura, foram encontrados indícios do uso desta técnica há mais de 2000 anos para aumentar a humidade do solo, reduzir a erosão, aumentar a temperatura média do solo e equilibrar a temperatura durante os picos diurnos (Lightfoot, 1997). Até ao ano 2000 o seu uso permanecia exclusivamente na agricultura, apesar de já se terem efectuado alguns estudos em tratamentos de estabilização ao solo em áreas aridas e provado a sua efetividade (Robichaud *et al.*, 2010).

A sua funcionalidade assenta em três características principais: (1) o “mulching” fornece rapidamente um aumento da área de coberto no solo, que absorve a energia das gotas de chuva, evitando assim o seu impacto direto no solo que iria resultar no desprendimento de partículas na primeira camada de solo e consequente mobilização aérea pela força do impacto, por sua vez, irá resultar numa menor degradação do agregado do solo; (2) a mesma camada protetora conserva a humidade do solo durante os picos de radiação diários, que por sua vez aumenta as taxas de infiltração da

escorrência superficial, aumenta a taxa de recuperação da vegetação e atividade biológica no solo; (3) a sua forma (que pode ser muito variada) oferece múltiplas micro-barreiras que retêm e armazenam os sedimentos, paralelamente esta obstrução na superfície do solo retarda a escorrência superficial, aumentando as probabilidades de esta infiltrar (Smets *et al.*, 2008; Bautista *et al.*, 2009).

O tipo de “mulching” utilizado em tratamentos de estabilização ao solo após incêndios é geralmente dividido em duas categorias, segundo a forma como este é aplicado (Robichaud *et al.*, 2010):

- Os “mulchings” húmidos, designados de “hydromulch”, são soluções de fibras naturais misturadas com água formando uma pasta que será depois espalhada no solo com recurso a bombas de pressão ou por tanques aerotransportados (Figura 3a).
- Os “mulchings” secos, usam materiais como palha, compostos agrícolas e resíduos florestais, são aplicados manualmente ou em lançamentos aéreos sem recurso a água (Figura 3b).



**Figura 3:** (a) tipos de “mulching’s” secos: 1 - palha; 2 - cascalho; 3 e 4 – pedras de rio; 5 – folhas de milho; 6 – caules de milho; 7 – lascas de madeira; 8 – casca de árvores; 9 – folhas de carvalho; 10-folhas de pinheiro (Smets *et al.*, 2008). (b) Exemplo de “mulching” húmido: coberto final de uma área ardida com “hydromulch” (Robichaud *et al.*, 2010)

Após a aplicação de “hydromulch” forma-se uma camada pastosa sobre o solo onde as fibras acabam por selar este, evitando a sua remoção, no entanto é pouco resistente a grandes caudais de escorrência superficial o que o torna pouco efetivo para encostas

muito longas, onde geralmente se formam raias de escorrência nos grandes eventos de precipitação (Napper, 2006). Nos últimos anos têm sido incorporados na mistura sementes de herbáceas nativas e floculantes do solo, com o objectivo de aumentar a sua efetividade (Bautista *et al.*, 2009).

Os “mulching’s” secos de palha foram o primeiro tipo a ser aplicado em áreas ardidas. Apesar de a sua aplicação ser bastante cara, necessitar de grandes quantidades de equipamentos e mão-de-obra, os “mulching’s” secos são considerados o tratamento de estabilização do solo após incêndio florestal com o melhor custo-benefício e com a menor taxa de insucesso (Bautista *et al.*, 2009). O seu desempenho bastante promissor e o aumento dos incêndios nos últimos anos, que levou a um aumento das áreas de risco, tornaram-se numa alavanca para a sua aplicação em larga escala. No entanto o uso de palha nesta técnica revelou alguns problemas. Em áreas de grande velocidade do vento a palha era arrastada, afectando fortemente a efetividade do tratamento. Por outro lado a palha frequentemente continha sementes invasoras, que ao germinarem iam influenciar o crescimento da vegetação nativa (Bautista *et al.*, 2009). Consequentemente, surgiram novos materiais a utilizar como “mulching” e foram aperfeiçoadas as técnicas de aplicação (Miles *et al.*, 1989; Robichaud *et al.*, 2010).

Nos últimos anos têm-se intensificado os estudos relativamente à utilização de “mulching” com materiais florestais. Os materiais mais comuns são folhas, cascas de árvores, ramos triturados, entre outros. Os resultados demonstram que a efetividade destes difere muito consoante a tipologia dos materiais utilizados, mas revelam ser menos afectados por arrastamento do vento e não transportam consigo sementes invasoras, que eram um dos maiores problemas encontrados no “mulching” de palha (Shakesby *et al.*, 1996; Robichaud *et al.*, 2000). Com a crescente preocupação da sustentabilidade ecológica a longo prazo das intervenções de estabilização, tem-se dado mais ênfase nos últimos anos a tratamentos de “mulching” que utilizam matérias florestais do próprio local do incêndio (Riechers *et al.*, 2008).

Outra das inovações neste tipo de tratamento após incêndio florestal é a associação do “mulching” com floculantes do solo que promovam a infiltração da escorrência superficial (por exemplo poliacrilamidas). Ainda existem poucos estudos nesta prática, mas esta possibilidade pode ajudar a reduzir as taxas de aplicação do “mulching”, que consequentemente reduzem os custos do tratamento (Riechers *et al.*, 2008; Bautista *et al.*, 2009).



Em Portugal Shakesby *et al.*, (1996) testou dois tratamentos de “mulching” feitos a partir dos restantes ramos e paus que sobreviveram a um incêndio. Os tratamentos apenas foram efectuados no segundo ano após o incêndio, e tiveram lugar em áreas de diferentes vegetações (pinheiro e eucalipto). As taxas de aplicação foram bastante diferentes consoante o tipo de vegetação, para o pinhal foram aplicados  $18 \text{ Mg ha}^{-1}$  o que representou um coberto de apenas 8%, na área de eucalipto foram aplicados  $46 \text{ Mg ha}^{-1}$  traduzindo-se em 89% de solo coberto. Os resíduos de eucalipto obtiveram uma redução da erosão em 91% mas na outra área os resíduos de pinheiro não foram efetivos. Esta primeira experiencia em Portugal veio indicar que os restos florestais de uma área ardida por si só podem não ser suficientes para produzir um “mulching” com elevada área de coberto (apenas 8% na área de pinheiro), por outro lado na área de eucalipto, com um coberto de 91% os resíduos de eucalipto foram efetivos. No entanto este estudo apenas apresenta resultados para o segundo ano após o incêndio floresta, ficando ainda por estudar os efeitos para o primeiro ano, onde se esperam ser mais importantes.

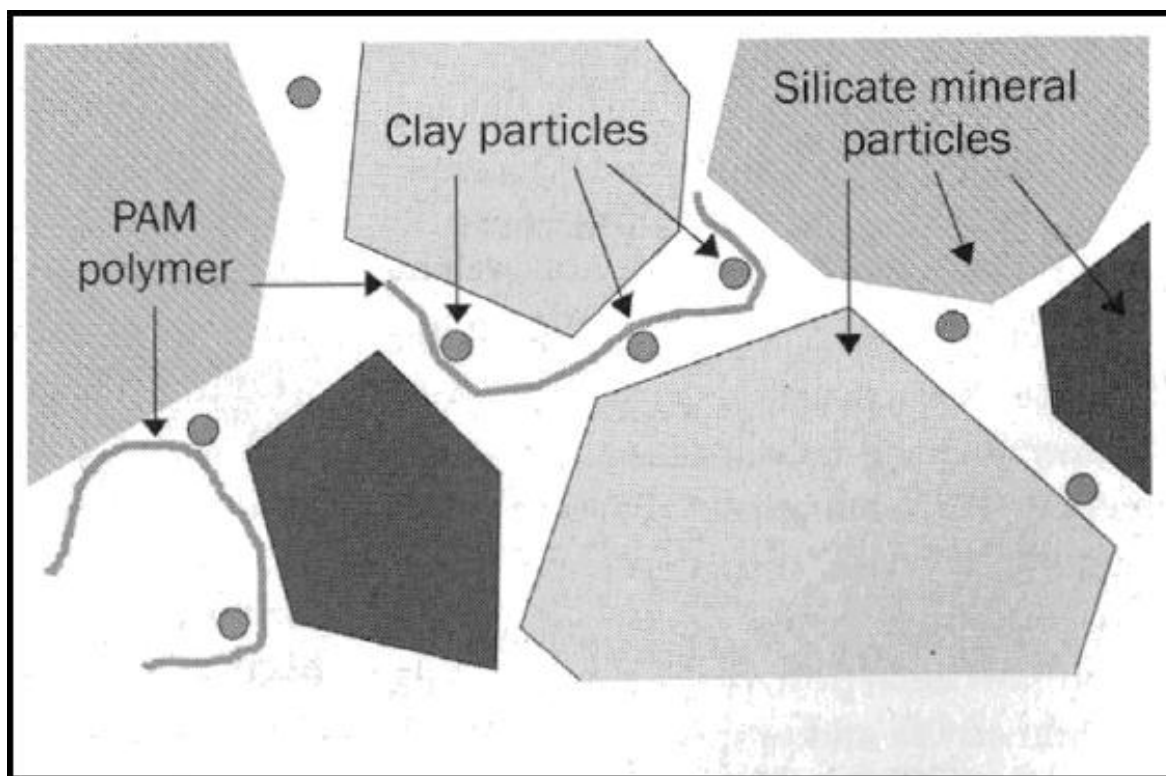
A segunda experiencia de tratamentos com “mulching” é reportada por Prats *et al.*, (2012) onde aplicou diferentes tratamentos em áreas de pinhal e eucaliptal logo após a ocorrência de um incêndio florestal. Na área de pinhal aplicou com uma taxa de  $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  “mulching” feito de troncos de pinheiro triturado que resultaram num coberto do solo de 76%. Na outra área aplicou “mulching” de casca de eucalipto com uma taxa de  $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  o que resultou num coberto do solo de 67%. Para o primeiro ano após incêndio o “mulching” de casca de eucalipto apresentou uma redução da erosão de 86%, no entanto o “mulching” produzido a partir de troncos de pinheiro triturado não foi efetivo. Neste estudo, foi evidente que os resíduos de eucalipto podem ser efetivos a uma menor taxa ( $46 \text{ Mg ha}^{-1}$  em Shakesby *et al.*, (1996) contra  $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  Prats *et al.*, (2012)). Também se observou que o “mulching” de pinheiro não se torna efetivo com uma maior taxa de coberto do solo (8% em Shakesby *et al.*, (1996) e aumentado para 76% em Prats *et al.*, (2012)).

Estes dois estudos foram efectuados para uma escala de parcela com  $16\text{m}^2$ , ficando por clarificar se numa maior escala se mantêm estes resultados. Como referido anteriormente, em encostas mais longas é comum, em termos totais, o aumento da quantidade de escorrência e erosão, portanto é de extrema importância o conhecimento da efetividade dos tratamentos para maiores escalas.

#### 1.2.4 TRATAMENTOS DE ESTABILIZAÇÃO AO SOLO COM POLIACRILAMIDAS

Nos últimos 50 anos várias fórmulas de poliacrilamida (PAM) têm sido utilizadas em irrigações agrícolas para promover as taxas de infiltração do solo e reduzir a sua erosão. Em tratamentos de estabilização após incêndio, o PAM é geralmente utilizado como complemento a outros tratamentos e raramente foi estudado separadamente (Robichaud *et al.*, 2010).

Segundo Ben-Hur, (2006) o PAM afecta a estabilidade do solo através de dois mecanismos: (1) a adsorção do polímero pela superfície das partículas de argila (Figura 4) causa uma reação físico-química que muda a sua superfície, reduzindo as forças repulsivas destas partículas; (2) a molécula de PAM acuta como uma ponte entre as partículas de solo e o agregado, juntando estes com fortes ligações.



**Figura 4:** Esquema do funcionamento das ligações de PAM com as partículas de argila entrelaçadas com os silicatos minerais (Davidson *et al.*, 2009).

A poliacrilamida é o único tipo de floculante que foi testado em tratamentos de estabilização após incêndios, no entanto existem centenas de diferentes fórmulas

moleculares com carga positiva, negativa, diferentes solubilidades e peso molecular. Estes tratamentos são uma opção mais económica e simples mas a sua utilização em áreas ardidas está ainda muito pouco desenvolvida (Riechers *et al.*, 2008; Davidson *et al.*, 2009; MacDonald *et al.*, 2009).

Em solos com estrutura degradada e em solos franco arenosos o PAM tem uma tendência a aumentar a viscosidade de infiltração da água, reduzindo assim as taxas de infiltração no solo (Sojka *et al.*, 2007). Mas para solos argilosos o PAM revelou alta afinidade nas ligações entre os agregados e a molécula e também forte resistência a ser removido (Davidson *et al.*, 2009).

Para além da influência do tipo de solo, alguns autores afirmam que o PAM, para cobertos superiores a 60% de cinzas, liga-se facilmente a estas reduzindo as suas ligações com o solo, perdendo assim o principal mecanismo de proteção contra erosão (MacDonald *et al.*, 2009).

O PAM vai-se degradando com o tempo devido à radiação solar, e tem uma longevidade no solo entre 3 -12 meses. É desejável que um tratamento de estabilização ao solo perdure entre 2 a 3 anos após o incêndio, quando já será esperado o restabelecimento da vegetação. Com uma fraca longevidade não é recomendável aplicar este tratamento sozinho (Robichaud *et al.*, 2010). No entanto, pode ser uma das melhores opções em associações de tratamentos. Alguns autores referem que o PAM melhora a efetividade em associações com a técnica de semear herbáceas, com as barreiras de trocos e com o “mulching” (McLaughlin *et al.*, 2009).

As poliácridamidas nunca foram testadas na estabilização de solos após incêndios em Portugal, pelo que não é conhecido o seu desempenho em mitigar os impactos associados à ocorrência de um incêndio florestal tendo em consideração as condições climáticas, tipo de solo e vegetação Portuguesas.

### **1.3 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Como referido anteriormente, o presente estudo tem como principal objectivo avaliar a efetividade de dois tratamentos na redução da escorrência e erosão do solo num eucaliptal recentemente ardido no centro norte de Portugal.

Os objetivos específicos são:



- Verificar a redução de escorrência e sedimentos numa encosta ardida para o primeiro ano de monitorização nos dois tratamentos: aplicação de “mulching” composto de cascas de eucalipto e a libertação de um floculante do solo (PAM);
- Estudar as diferenças na resposta hidrológica e a suas variações para o “mulching” de casca de eucalipto na escala de microparcela (0,24m<sup>2</sup>) e à escala de encosta (100m<sup>2</sup>)
- Avaliar o efeito de certos fatores espaciais tais como a posição na encosta e coberto do solo na efetividade dos tratamentos;
- Analisar as variações temporais dos tratamentos para a escorrência, coeficiente de escorrência, perda de sedimentos e taxa de perda de sedimentos;
- Determinar entre a quantidade e intensidade da chuva qual o fator mais determinante na produção de escorrência e perda de sedimentos nos diferentes tratamentos;

A dissertação tem o seu início com um primeiro capítulo onde se enquadra o presente trabalho, seguido de estudos da mesma temática realizados anteriormente em Portugal e uma breve introdução aos tratamentos de estabilização ao solo após a ocorrência de um incêndio florestal.

O segundo capítulo, redigido em formato de artigo científico, contempla a descrição da área em estudo, a metodologia usada na recolha de amostras, análises laboratoriais e estatísticas, os resultados obtidos e a discussão e conclusões dos mesmos.

A dissertação termina com o terceiro capítulo onde são efetuadas as conclusões finais da dissertação, referindo algumas indicações para trabalhos futuros. Por fim são enumeradas as referências bibliográficas utilizadas neste documento.



## **CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DE DOIS TRATAMENTOS NA REDUÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA DO SOLO APÓS FOGO**

## **Avaliação da efetividade de dois tratamentos na redução da erosão hídrica do solo após fogo**

Martins M.A.S.\*; Prats S.A.\*\*; Keizer J.J.\*\*

\* Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

\*\* Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

### **2.1 RESUMO**

Portugal sofre todos os anos inúmeros incêndios florestais, provocando frequentemente aumentos do escoamento superficial e erosão nas áreas afectadas. O tratamento de estabilização com “mulching” tem sido apontado por vários estudos, nomeadamente estrangeiros, como uma das melhores técnicas para mitigar estes impactos.

Este estudo avalia a efetividade de um tratamento com “mulching” e de outro tratamento inovador com poliacrilamidas aniónicas na redução de escorrência e perda de sedimentos num eucaliptal após incêndio no centro norte de Portugal. A avaliação é feita a duas escalas espaciais, sendo o enfoque desta tese na escala de microparcela (0,24m<sup>2</sup>) mas abordado também a escala de encosta (100m<sup>2</sup>). Na escala de microparcela foram instaladas 12 parcelas, sendo destas, 4 de controlo (não tratado), 4 com “mulching” e 4 com poliacrilamida. Na escala de encosta foram instaladas 3 parcelas de controlo e 3 com “mulching”.

Durante o primeiro ano de monitorização com uma precipitação de 1442 mm, as parcelas de controlo (não tratados) apresentaram em média um coeficiente de escorrência de 45% na pequena escala e 2,5% na escala de encosta, e uma perda de sedimentos de 7,8 Mg ha<sup>-1</sup> e 0,81 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente.

O tratamento com “mulching” composto de casca de eucalipto, aplicado a uma taxa de 13,6 Mg ha<sup>-1</sup> com um coberto do solo de 80%, reduziu a escorrência em 55% e a perda de sedimentos em 90%, tanto à escala das microparcelas como à escala de encosta. O tratamento com poliacrilamidas anionicas, aplicado apenas na pequena escala a uma

taxa de 0,05 Mg ha<sup>-1</sup>, reduziu a escorrência em 20% mas não alterou a perda de sedimentos.

A dimensão das parcelas e, no caso das microparcelas, a sua posição na encosta revelaram-se factores importantes do ponto de vista dos processos hidrológicos e erosivos. Estes resultados ajudaram ainda a clarificar o conhecimento da conectividade hidrológica em encostas ardidas, e a importância da severidade do incêndio e do coberto do solo.

**Palavras chave:** “mulching” ; PAM ; erosão do solo ; escorrência ; incêndios florestais

### **Abstract**

Portugal suffers every year from many wildfires causing increased superficial runoff and erosion in the affected areas. The post-fire stabilization treatments with “mulching” have been appointed by many authors as one of the better techniques to relieve these impacts.

This study evaluates the effectiveness of one treatment with “mulching” and another treatment with anionic polyacilamide in reducing overland flow and erosion in a eucalyptus forest after fire in northern central Portugal. The assessment is made in two spatial scales, being the focus of this thesis in the range of micro-plots (0.24 m<sup>2</sup>) but also addressed the slope scale (100m<sup>2</sup>). On micro-plot scale were installed 12 plots, four control (untreated), 4 with "mulching" and 4 with polyacrylamide. On slope scale were installed 3 control plots and 3 plots with "mulching".

After the first year the mean precipitation was 1442 mm, the control plots show 45% of runoff coefficient in the small scale and 2,5% in the slope scale and obtained 7,8 Mg ha<sup>-1</sup> and 0,81 Mg ha<sup>-1</sup> of sediment loss respectively.

The treatment with chopped bark “mulching”, applied with a rate of 13,6 Mg ha<sup>-1</sup> with 80% of soil cover, reduced runoff in 55% and sediment loss in 90% in the two scales. The other treatment with anionic polyacrylamide only applied in micro-plots scale with a rate of 0,05 Mg ha<sup>-1</sup> reduced runoff in 20% but was not effective in reducing sediment losses.

Plot size and, in the case of micro-plot, the position on the slope proved to be important factors in the hydrological and erosive response. These results help to clarify the hydrologic connectivity knowledge in burned slopes, the role of fire intensity and ground cover.

**Keywords :** “mulching” ; PAM ; soil erosion ; runoff ; wildfires

## 2.2 INTRODUÇÃO

Portugal sofre todos os anos inúmeros incêndios florestais. Desde 1980 arderam mais de 1,4 Mha de área arborizada (DGRF, 2006), facto que levou nas últimas décadas a comunidade científica a estudar quais os efeitos e os riscos associados aos incêndios florestais no território português.

Um grande número de estudos, dentro e fora de Portugal, indica que os incêndios florestais provocam o aumento do escoamento superficial e risco de erosão (Shakesby, 2011). Estes efeitos são atribuídos à consequente degradação do solo e perda do seu coberto vegetal (Bautista *et al.*, 1996; Ferreira *et al.*, 2008). Alguns autores sugerem que o efeito mais preocupante na degradação do solo é a perda de estabilidade dos agregados do solo e repelência à água, que por sua vez irão influenciar a resposta hidrológica deste (Coelho *et al.*, 2004 ; Doerr *et al.*, 2006). Por outro lado, a perda do coberto vegetal deixa o solo desprotegido do impacto das gotas da chuva e sem a capacidade de reter e retardar o escoamento superficial (Wagenbrenner *et al.*, 2006).

Por todo o mundo têm sido estudados diferentes tratamentos ao solo após incêndios florestais para mitigar estes efeitos (Miles *et al.*, 1989; Bautista *et al.*, 1996; Wagenbrenner *et al.*, 2006; Robichaud *et al.*, 2008) e a maioria deles concorda que aumentar o coberto do solo para valores superiores a 60% após incêndios de alta intensidade pode resultar na mitigação dos seus efeitos. No entanto existem poucos estudos acerca da aplicação de tratamentos de emergência ao solo após incêndio em Portugal, e não existe nenhum que estude os efeitos a uma escala superior a 16m<sup>2</sup> (Shakesby *et al.*, 1996; Prats *et al.*, 2012).

O “mulching” é um tratamento que consiste em aplicar materiais por forma a proporcionarem um coberto sobre a superfície do solo até a vegetação se restabelecer (Miles *et al.*, 1989). Tipicamente tem sido utilizada palha, mas existem outros materiais que podem substituí-la. Atualmente existe um grande interesse em implementar diferentes métodos de “mulching”, que sejam de fácil aplicação ou usem materiais do próprio local (Beyers *et al.*, 2008). Os resíduos do processamento de casca de eucalipto parecem ser uma boa opção para a técnica de “mulching” em Portugal, principalmente porque são mais baratos que a palha e também porque são abundantes devido à recente utilização de biomassa florestal para a produção de energia eléctrica (Prats *et al.*, 2012), estando ainda por confirmar a sua disponibilidade para serem aplicados em tratamentos de estabilização ao solo após incêndios florestais.

A aplicação de Poliacrilamidas (PAM) para reduzir a erosão em canais de irrigação agrícolas tem sido intensivamente estudada nos últimos anos (Lentz e Sojka, 2000). Estes flocculantes químicos promovem a infiltração da água no solo através de uma atracção iónica que liga as partículas de argila (Vacher *et al.*, 2003). Recentemente, o PAM tem sido utilizado com resultados satisfatórios no controlo da erosão em taludes de vias rodoviárias (Ben-Hur, 2005). Estes tratamentos poderiam ser uma opção muito mais económica e simples do que a aplicação de “mulching”, mas a sua utilização em áreas áridas está ainda muito pouco testada (Riechers *et al.*, 2008; Davidson *et al.*, 2009; MacDonald *et al.*, 2009).

O objectivo principal deste estudo foi avaliar a efetividade de dois tratamentos na redução de escoamento superficial e erosão do solo num eucaliptal recentemente ardido no centro norte de Portugal. Os objectivos específicos focaram-se em: (1) verificar a redução de escorrência e sedimentos numa encosta ardida para o primeiro ano de monitorização nos dois tratamentos: aplicação de “mulching” composto de cascas de eucalipto e a aplicação de um flocculante do solo (PAM); (2) estudar as diferenças na resposta hidrológica e a suas variações para o “mulching” de casca de eucalipto na pequena escala (0,24m<sup>2</sup>) e à escala de encosta (100m<sup>2</sup>); (3) avaliar o efeito de certos factores espaciais tais como o declive, posição na encosta e coberto do solo na efetividade dos tratamentos; (4) Analisar as variações temporais dos tratamentos para a escorrência, coeficiente de escorrência, perda de sedimentos e taxa de perda de sedimentos; (5) Determinar entre a quantidade e intensidade da chuva qual o factor mais determinante na produção de escorrência e perda de sedimentos nos diferentes tratamentos.

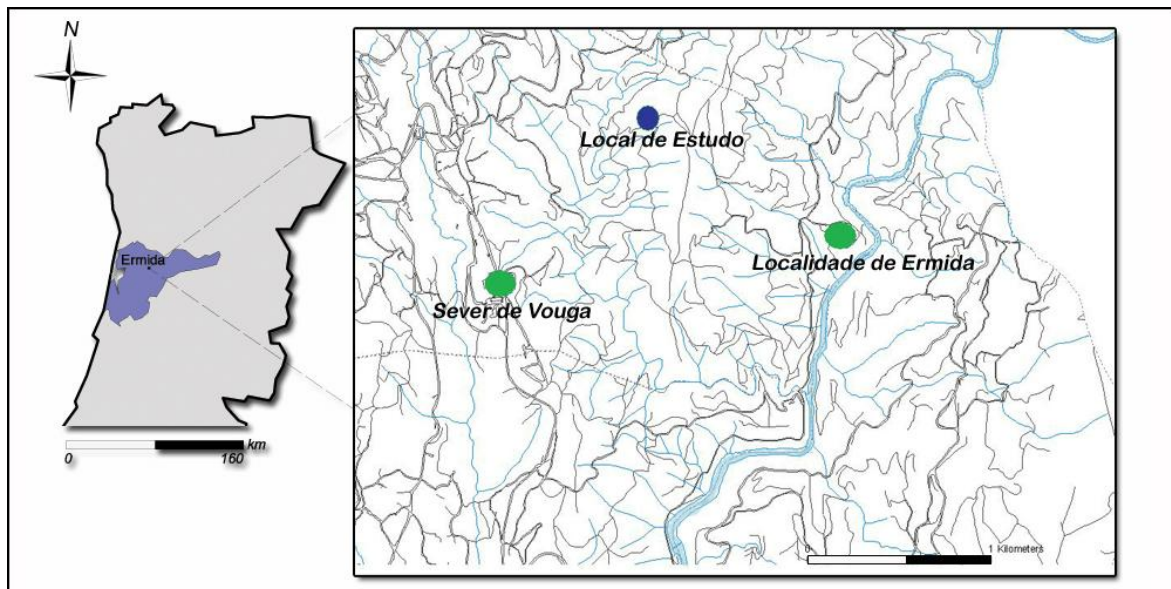
## 2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na localidade de Ermida, município de Sever do Vouga (40°43'N; 8°20'O), Distrito de Aveiro no Centro Norte de Portugal (Figura 5). A área de estudo foi seleccionada devido á ocorrência de um incêndio florestal a 26 de Julho de 2010, durante o qual arderam um total de 295 hectares (AFN, 2010).

O clima da área de estudo pode ser classificado como mesotérmico (temperado) húmido, com uma estação seca durante um verão moderadamente quente mas extenso (Köppen:Csb - DRA-Centro, 1998). Na estação udométrica mais próxima (Ribeiradio; 40.736551 N, -8.300862 W; SNIRH,2011, 228m de altitude), a precipitação anual é em

média 1609 mm mas varia entre 960 e 2530mm (SNIRH,2011: 1990-2010). Na estação climatológica mais próxima (Barragem de Castelo Burgães; 40.853 N, -8.379W, 306m de altitude), a temperatura média anual dos últimos vinte anos é 14,9°C enquanto as médias mensais variam entre os 9,0°C em Janeiro e os 21,1°C em Junho (SNIRH,2011: 1990-2010).



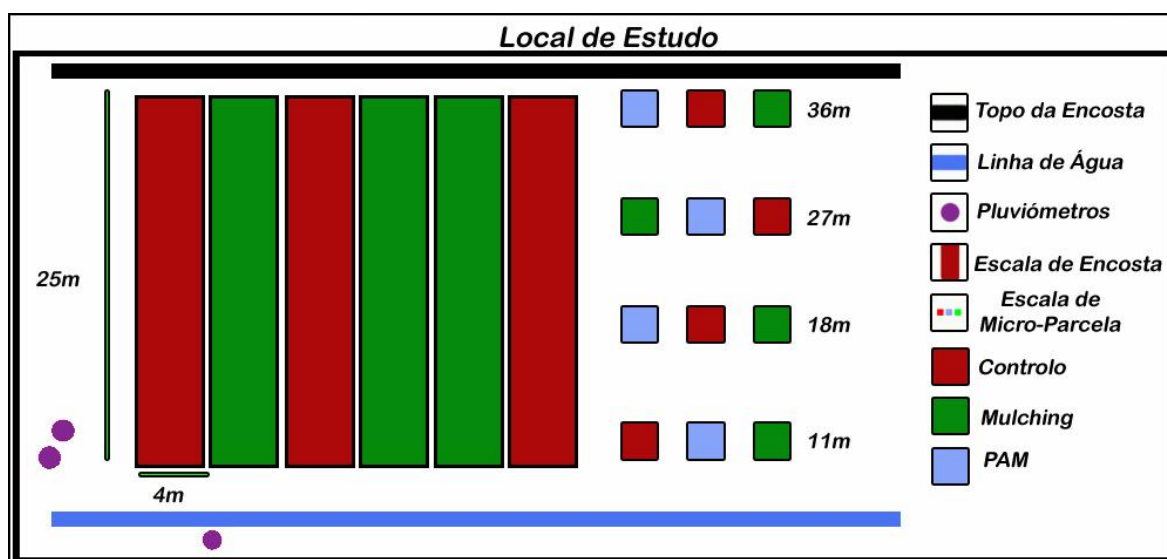
**Figura 5:** Localização da área e do local de estudo

Dentro da área ardida foi seleccionada uma encosta por este estudo, nomeadamente por ser íngreme (25°). Está localizada a 40°44'05"N; 8°21'18"O, a uma altitude de 200m do nível do mar e orientada para SE. Antes do fogo, a encosta de estudo estava coberta predominantemente por eucaliptos (*Eucalyptus globulus*) em 4ª rotação junto com alguns indivíduos dispersos de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster*) e Carvalho (*Quercus robur*). Os eucaliptos tinham, de facto, sido cortados pouco tempo antes do fogo, uma vez que os troncos ainda se encontravam empilhados na base da encosta. O coberto vegetal foi totalmente consumido e quase não existe manta morta (litter). A severidade do fogo na encosta parece ter sido moderada, nomeadamente porque as cinzas estavam pretas e porque a vegetação arbustiva e rasteira bem como a manta morta foram consumidas quase por inteiro. Os solos onde a encosta esta inserida variam entre Cambisol e Leptosol Húmicos (WRB, 2006). Quatro amostras recolhidas ao longo da encosta (junto das microparcels: ver 2.3.2) mostraram que o solo ente 0-10cm de profundidade tinha uma pedregosidade muito elevada ( $53,5 \pm 4,7\%$ ), um teor de matéria orgânica alto ( $10,3 \pm 1,8\%$ ), e uma densidade aparente baixa ( $1,10 \pm 0,13 \text{ gcm}^{-3}$ ).



### 2.3.2 DESENHO EXPERIMENTAL

O desenho experimental implementado na encosta de estudo consistia num total de 18 parcelas de erosão, todas elas delimitadas (figura 6). Doze microparcelas de 0,24 m<sup>2</sup> (pequena escala) foram distribuídas em quatro conjuntos de três a distâncias aproximadamente constantes desde a base até ao topo da encosta (figura 7b). As restantes seis parcelas compreendiam a escala de encosta, tendo larguras entre 4 e 5 m e comprimentos entre 20 e 25m e, portanto, tendo superfícies de forma geral com 100 m<sup>2</sup> (figura 7a). Duas destas parcelas à escala de encosta foram equipadas nas suas bases com saídas ligadas a tanques de 70, 400 e 500l para recolher a escorrência superficial, enquanto outras quatro foram equipadas com barreiras de sedimentos (“sediment fences”: Robichaud *et al.*, 2008). O atual estudo limitou-se às primeiras duas parcelas, junto com as doze microparcelas, igualmente ligadas a tanques (de 30l).



**Figura 6:** Esquema das parcelas de controlo e tratadas na pequena escala e escala de encosta

As 18 parcelas foram instaladas durante os últimos dias de Agosto de 2010. O total de precipitação perdido entre o incêndio e a instalação das parcelas não foi expressivo (0,7 mm). Os tratamentos com “mulching” e poliacrilamida (PAM), por sua vez, foram aplicados a 15 de Setembro de 2010 e 4 de Outubro de 2010, respectivamente. Este envolvia restos triturados de casca de eucalipto, comprados a uma empresa de reciclagem de resíduos florestais (SÓCASCAS, SA). O “mulching” foi aplicado a uma densidade de  $13,6 \pm 1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  em três das parcelas à escala de encosta, seleccionadas ao acaso, e em

quatro das microparcelas, selecionadas ao acaso por cada conjunto. O PAM, com designação comercial de “Superfloc 110-c” e cedido pela empresa Quimitécnica, SA foi aplicado a uma taxa de  $0,05 \text{ Mg ha}^{-1}$  em quatro das microparcelas, também elas selecionadas ao acaso por cada conjunto. Adjacente à encosta, foram instalados três pluviômetros em Agosto de 2010, dois totalizadores (medidos semanalmente) e um automático com a capacidade de  $0,2 \text{ mm tip}^{-1}$ , usado para estimar a intensidade máxima da chuva em 30min em períodos semanais de monitorização.



**Figura 7:** (a) Parcelas da escala de encosta; (b) Parcelas da pequena escala; (c) Grelha de descrição de coberto na pequena escala.

### 2.3.3 *RECOLHA DE AMOSTRAS E ANÁLISES LABORATORIAIS*

A partir de 25 de Agosto de 2010 o volume de escorrência recolhida nos tanques e o volume de precipitação nos pluviómetros foi medido com intervalos de uma semana. Simultaneamente foram colectadas amostras de 1500mL em cada tanque. Durante o período de amostragem (23 Agosto 2010 a 24 de Agosto de 2011) foram recolhidas 43 observações

No laboratório, as amostras de escorrência foram filtradas com filtros de 12-14  $\mu\text{m}$  de poro previamente pesados. Os filtros com sedimentos foram subsequentemente pesados após serem secos numa estufa durante 24 horas a 105°C, bem como após serem calcinados durante 4 horas a 550°C, para determinação das concentrações de sedimentos e matéria mineral.

As descrições do coberto do solo foram efectuadas a 5 de Novembro de 2010 e 4 de Maio de 2011. Nas duas parcelas à escala de encosta foi usada uma grelha com um tamanho total de 1m<sup>2</sup> e um espaçamento de 10x10 cm, perfazendo um total de 100 pontos de intersecção executados em cinco posições diferentes dentro de cada parcela (desde a base até ao topo da encosta). Nas doze parcelas de pequena escala, foi usada uma grelha com um tamanho total de 0,25m<sup>2</sup> e um espaçamento de 5x5 cm, perfazendo um total de 100 pontos de intersecção na totalidade de cada parcela (Figura 7c). A descrição do coberto do solo foi registada com três categorias protetoras do solo: “litter” (folhas, paus, raízes mortas e “mulching”), pedras e vegetação; e duas para solo desprovido de coberto: cinza e solo nu.

### 2.3.4 *ANÁLISES ESTATÍSTICAS*

A normalidade dos dados de escorrência, perdas de solo e matéria orgânica obtidos foi verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov. Como todos dados tinham distribuições que eram significativamente diferentes de uma distribuição normal, utilizou-se o coeficiente de correlações de Spearman para aferir as tendências espaciais e temporais nos dados. Por outro lado, transformou-se estes mesmos dados de forma logarítmica para averiguar os efeitos dos diferentes tratamentos, do tempo após fogo e das diferentes posições na encosta através de uma análise de variância de três vias para medições na escala de microparcela e uma análise de duas vias (sem diferentes posições) na escala de encosta.

## 2.4 RESULTADOS

### 2.4.1 TOTAIS DE ESCORRÊNCIA E PERDA DE SEDIMENTOS, E COBERTO DO SOLO

Durante o primeiro ano após o fogo (23 Agosto 2010 a 24 de Agosto de 2011), observou-se um total de 1442 mm de precipitação, o que está 10% abaixo da média anual dos últimos vinte anos na estação climatológica mais próxima (Ribeiradio, SNIRH 2011). A escorrência total obtida nas parcelas controlo (não tratadas) foi de 944 mm para a escala de microparcela (valor médio) e 45 mm para a escala de encosta (Tabela 1). Houve portanto uma grande diminuição da escorrência entre a escala de microparcels e a escala de encosta. O mesmo se verificou no coeficiente de escorrência, que foi de 45% nas parcelas controlo da escala de microparcela e 2,5% na parcela de controlo da escala de encosta. Quanto aos tratamentos o “mulching” reduziu de uma forma notável (Tabela 1) a escorrência, i.e. para aproximadamente metade quer na escala de microparcela, quer na escala de encosta. O PAM também reduziu a escorrência à escala de microparcels de uma forma marcada em 20%.

Sem tratamento, as perdas de sedimentos durante o primeiro ano após fogo foram bastante elevadas à escala de microparcels com  $7,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , mas uma ordem de grandeza mais baixa à escala de encosta, sendo inferiores a  $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . O “mulching” reduziu as perdas de sedimentos de uma forma ainda mais acentuada que a escorrência, tanto para as microparcels (-91%) como para a parcela de encosta (-88%). Em contraste e apesar da diminuição de escorrência referida anteriormente, a aplicação do PAM resultou num aumento marcado das perdas de sedimentos (+23%). A matéria orgânica constituiu uma parte muito substancial dos sedimentos erodidos (sempre superior a 35%; tabela 1). Assim as perdas de matéria orgânica revelaram basicamente as mesmas tendências que as perdas de sedimentos. O PAM, no entanto, foi uma exceção, reduzindo ligeiramente as perdas de matéria orgânica em comparação com as microparcels não tratadas (-10%).

O “mulching” resultou num grande aumento do coberto do solo, definido neste estudo como o total dos cobertos protetores como sendo os de “litter” (i.e. principalmente composto pelos resíduos florestais do “mulching”), pedras e vegetação (Tabela 1). Em 5 de Novembro de 2010, 102 dias após a aplicação do “mulching”, o coberto era por volta de 90 % nas parcelas com “mulching” e menos de metade nas restantes parcelas. Houve, no entanto, diferenças marcadas entre estas últimas parcelas, tendo as microparcels cobertos duas vezes mais baixos que a parcela de encosta (aproximadamente 20 contra



40%). Estas diferenças diminuíram com o tempo, uma vez que o coberto das microparcels tinha aumentado por volta de 10% em Maio 2011 enquanto o coberto da parcela de encosta continuou igual. As parcelas com “mulching”, por sua vez, registaram uma ligeira diminuição do coberto do solo com 5 a 7% durante o período entre Novembro 2010 e Maio 2011.

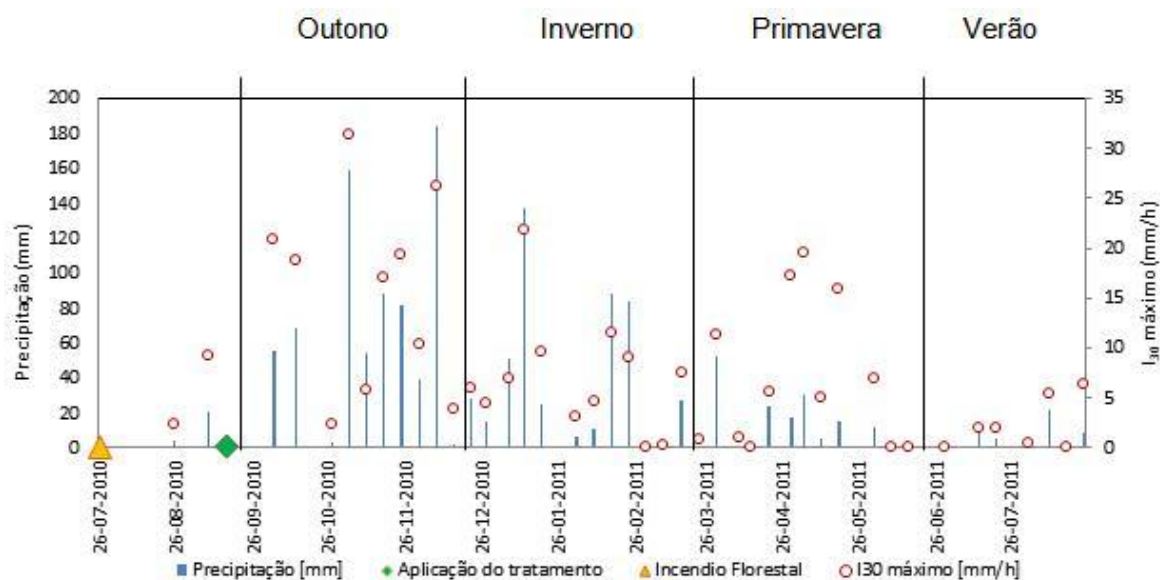
**Tabela 1:** *Escorrência, coeficiente de escorrência, perdas de sedimentos e matéria orgânica e coberto durante o primeiro ano após fogo.*

Escala	Escala de microparcels (valores médios n=4)			Escala de Encosta	
Parcela	Controlo	"Mulching"	PAM	Controlo	"Mulching"
Quantidade de chuva (mm)			1430		
Escorrência total (mm)	955	418	762	46	25
Redução do tratamento		56%	20%		46%
Coeficiente de Escorrência (%)	45,1	20,4	35,1	2,5	1,1
Redução do tratamento		55%	22%		50%
Perdas totais de sedimentos (Mg ha <sup>-1</sup> )	7,83	0,72	9,72	0,81	0,1
Redução do tratamento		91%	-24%		88%
Perdas totais de m. orgânica (Mg ha <sup>-1</sup> )	3,89	0,47	3,53	0,41	0,04
Redução do tratamento		88%	10%		91%
Solo coberto Novembro-2010 (%)	21	90	23	43	93
Solo coberto Maio-2011 (%)	32	83	34	43	88

#### 2.4.2 VARIAÇÃO SAZONAL DA PRECIPITAÇÃO, ESCORRÊNCIA E EROSÃO

Apesar da diferença entre a precipitação anual registada e a média para 20 anos ser pequena, nas estações do ano as diferenças foram mais expressivas. O Outono (22 de Setembro – 21 de Dezembro) com 738 mm de precipitação, registou mais 32% que a média para os últimos vinte anos (Ribeiradio, SNIRH 2011). Foi nessa estação que ocorreram as duas maiores observações semanais (155 e 176 mm; Figura 8), também as mais intensas (31 e 26 mm h<sup>-1</sup> de intensidade máxima em 30 minutos). Contrariamente, o Inverno (22 de Dezembro - 21 de Março) com 475 mm de precipitação registou menos 5% que a média para os últimos vinte anos, apresentando uma observação semanal importante (132 mm; 21 mm h<sup>-1</sup>). A Primavera (22 de Março – 21 de Junho) foi a principal contribuinte para a diferença encontrada nos valores anuais médios, onde apenas foram registados 157 mm de precipitação, menos 55% que a média dos últimos vinte anos para esta Estação do ano, sendo a maior observação semanal de 52 mm e 11,3 mm h<sup>-1</sup>. No verão, até ao fim deste estudo (24 de Agosto) estavam contabilizados 46 mm de

precipitação, sendo a maior observação semanal de pouca importância (22mm e 5,4 mm h<sup>-1</sup>).



**Figura 8:** Precipitação e Intensidade máxima de cada período de amostragem, data de ocorrência do incêndio e aplicação dos tratamentos.

A ocorrência de todo o período de monitorização concentrou-se quase na totalidade nas duas primeiras estações (Figura 9). No outono foi gerado entre 60-70% da ocorrência para todo o período de monitorização, independentemente do tipo de parcela ou tratamento. No inverno a ocorrência registou algumas diferenças entre as duas escalas monitorizadas, sendo aproximadamente 20% de todo o período de monitorização nas microparcels, independentemente do tratamento, 35% no controlo da escala de encosta e 20% no “mulching” desta mesma escala. Nas restantes estações a ocorrência foi pouco representativa em ambas as escalas, registando apenas 5-8% na primavera e 1% no verão do total de todo o período de monitorização.

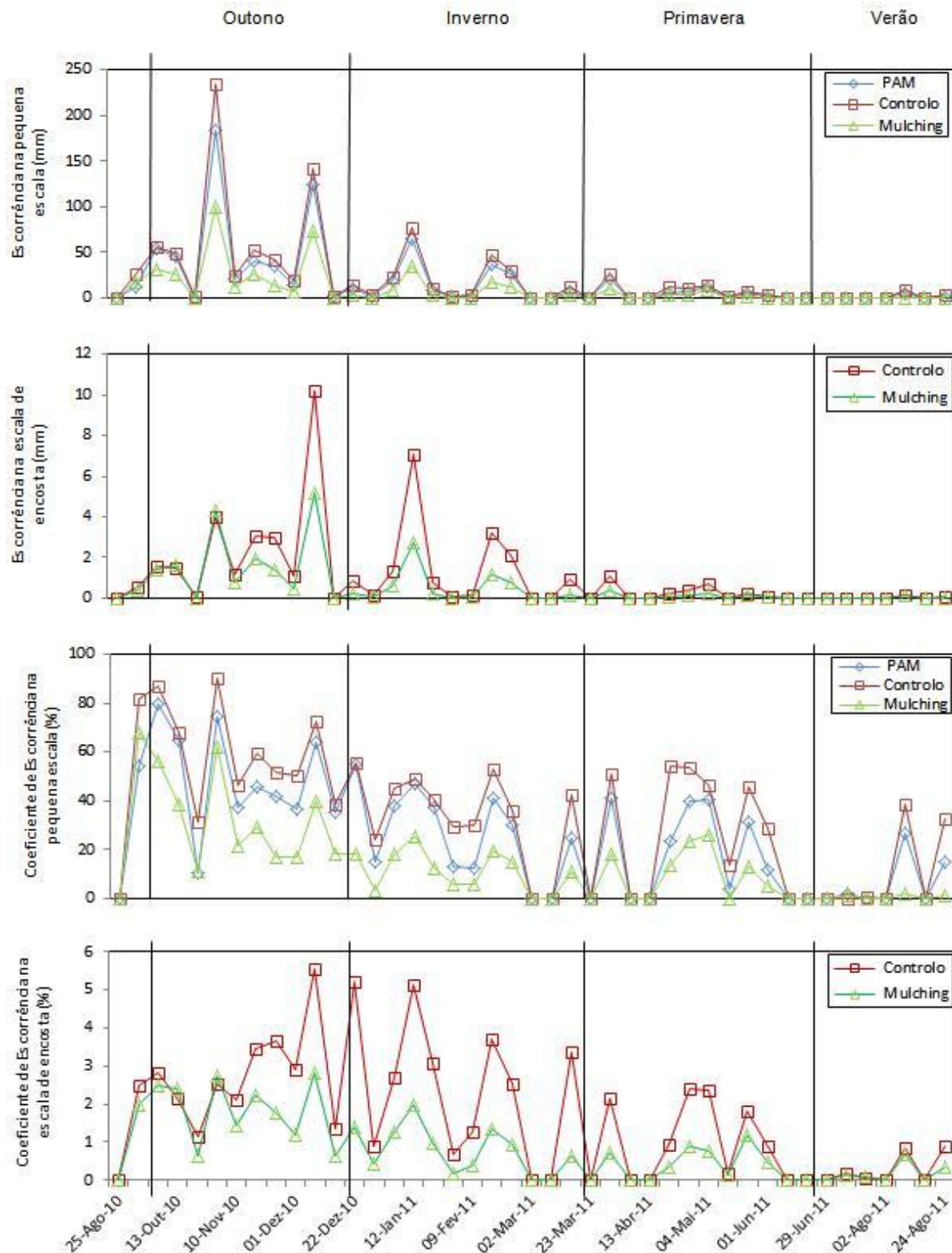
O coeficiente de ocorrência apresenta grandes diferenças entre as duas escalas ao longo do período de monitorização (Figura 9). Nos controlos da escala de microparcela é visível que o coeficiente de ocorrência apresenta um valor máximo logo após o incêndio (80%) mantendo-se alto por todo o outono, começando a decrescer a partir do inverno e apresentando um máximo de 30% no verão. Nos controlos da escala de encosta o máximo de coeficiente de ocorrência logo após o incêndio ronda os 2,5%, verificando-se um aumento com a chegada dos grandes eventos de precipitação (outono e inverno) apresentando aí um máximo de 5,5%. Após estes eventos é visível a descida deste

coeficiente, apresentando um máximo de 2,5% na primavera e um máximo de 1% no verão.

Na escala de microparcela o coeficiente de escorrência de ambos os tratamentos é quase sempre inferior aos valores das parcelas de controlo, no entanto nos primeiros eventos depois do incêndio essa diminuição não é tão visível, apresentando depois uma diminuição com o tempo mais rápida que as parcelas de controlo. Na escala de encosta o coeficiente de escorrência do “mulching” não apresentar um aumento tão acentuado com a chegada dos grandes eventos de precipitação, apresentando uma diminuição com o tempo logo após estes eventos.

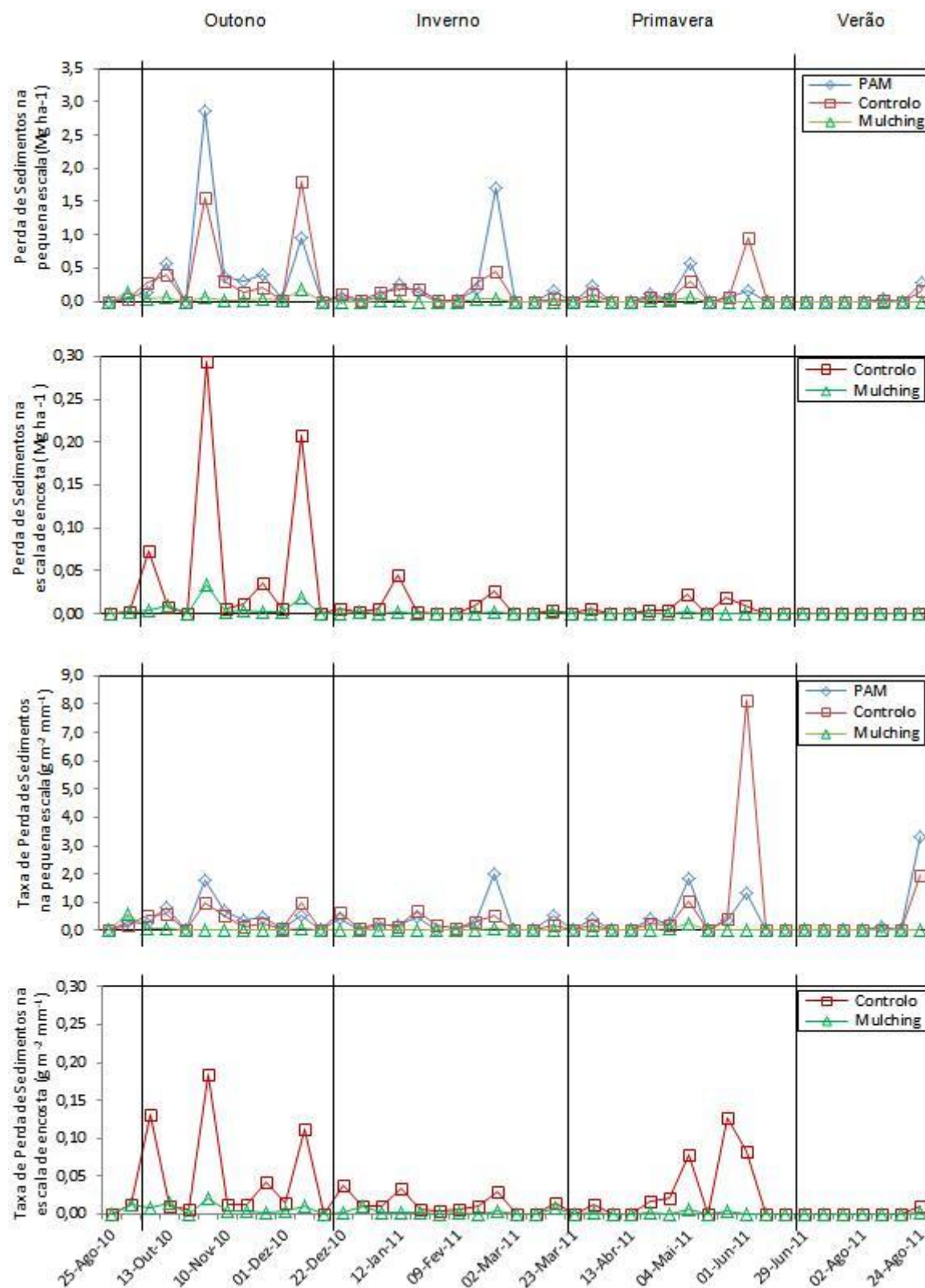
Tal como registado na escorrência, a perda de sedimentos foi quase toda registada nas duas primeiras estações, no entanto apresentou grandes diferenças entre as duas escalas. Para o outono obteve-se 60% na escala de microparcela e 80% na escala de encosta independentemente do tipo de tratamento (Figura 10). No inverno os valores variam na escala de microparcela entre 17% no controlo, 13% no “mulching” e 27% no PAM, sendo que, neste período a escala de encosta representou igualmente 12% para o controlo e “mulching”. Na primavera a perda de sedimentos do controlo e o “mulching” da escala de microparcela apresentam valores superiores ao inverno (17% no inverno, 19% na primavera), enquanto o PAM produziu metade dos sedimentos que nessa estação. Estes aumentos não se verificam na escala de encosta, em que a perda de sedimentos foi inferior ao inverno, tanto no controlo como no “mulching” (12% no inverno, 8% na primavera). No verão a perda de sedimentos foi pouco representativa, não indo além dos 3% do total de todo o período de monitorização, independentemente do tipo escala ou tratamento.

Por sua vez, a taxa de perda de sedimentos no controlo da escala de microparcela (Figura 10) apresenta os valores mais baixos nas estações mais chuvosas (outono e inverno), ficando-se pelos  $0,9 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  de máximo registado e apresenta os valores mais elevados (máximo de  $8 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ) nas estações mais secas (primavera e verão). Contrariamente a escala de encosta apresenta dois conjuntos de picos temporais na taxa de perda de sedimentos, onde o primeiro coincide com os grande eventos do outono apresentando um máximo de  $0,18 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  e o outro na primavera (tal como na pequena escala) apresentando um máximo de  $0,13 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ . O “mulching” claramente não sofre qualquer alteração com o tempo apresentando pouca ou nenhuma variação na taxa de erosão em ambas as escalas. Já o PAM apresenta grande variabilidade registando picos em todas as estações do ano.



**Figura 9:** Variabilidade temporal dos valores médios de escorrência e coeficiente de escorrência nas parcelas de pequena escala e escala de encosta para todo o período de amostragem.



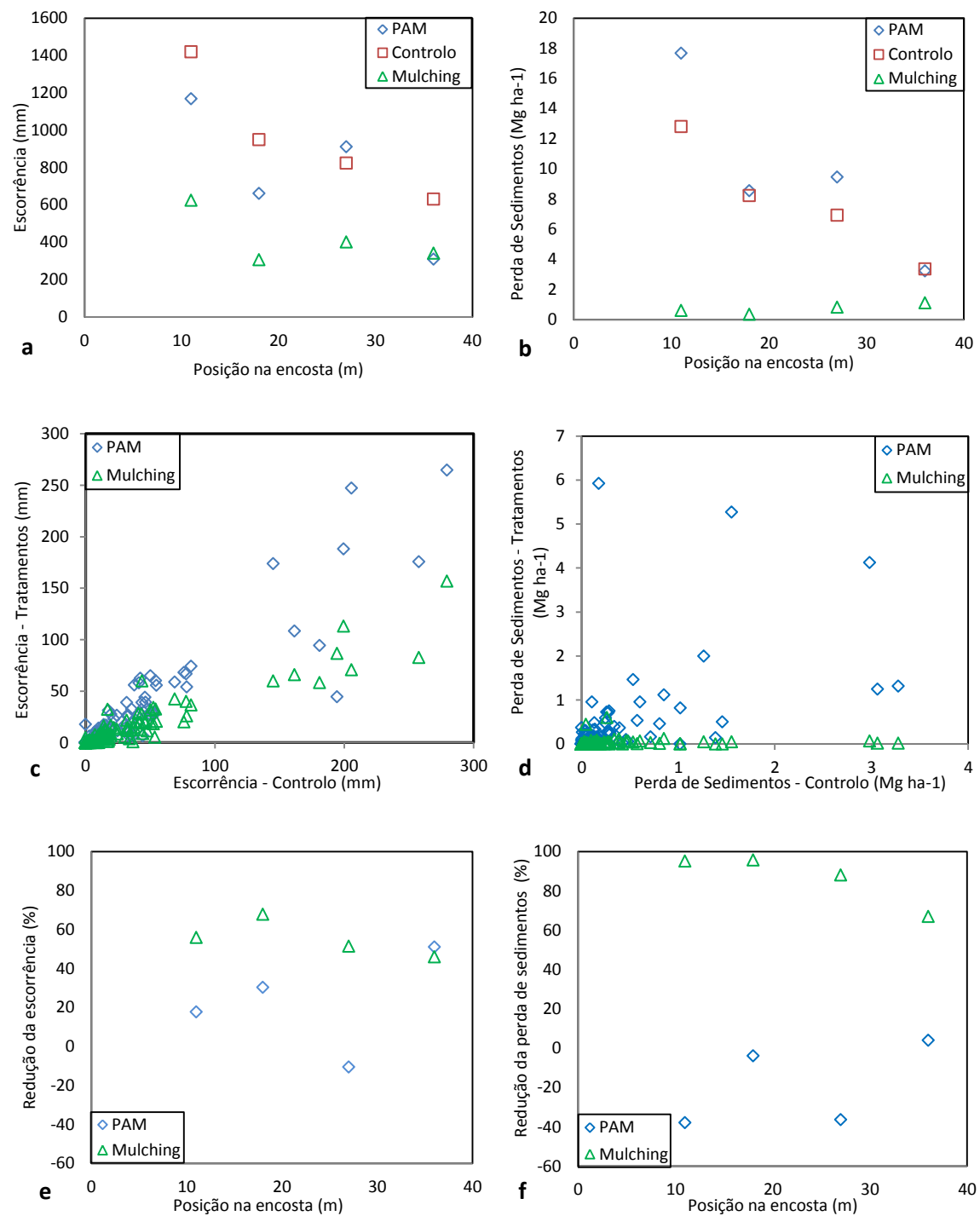


**Figura 10:** Variabilidade temporal da perda de sedimento média e taxa de erosão média nas parcelas de pequena escala e escala de encosta para todo o período de amostragem.

#### 2.4.3 VARIABILIDADE ENTRE A BASE E O TOPO DA ENCOSTA

As quatro microparcelas não tratadas mostraram uma variabilidade notável entre si (Figura 11a, b). Os seus totais de escorrência variavam aproximadamente o dobro (630 a 1400 mm), enquanto as suas perdas de sedimentos variavam ainda mais, num factor de três (3,3 a 11,1 Mg ha<sup>-1</sup>). Em ambos os casos, os valores revelaram um componente espacial bem definido, o da posição na encosta. As parcelas sujeitas a “mulching” produziram quantidades de escorrência e sedimentos bastante similares (314 a 620 mm; 0,6 a 1,1 Mg ha<sup>-1</sup>) e sem um papel evidente da posição na encosta. Por sua vez, as parcelas tratadas com PAM demonstraram igualmente notáveis diferenças na escorrência (310 a 1200 mm) e perdas de sedimentos (3,4 a 17,6 Mg ha<sup>-1</sup>). As relações com a posição da encosta, no entanto, eram menos evidentes, nomeadamente para as duas parcelas do meio.

Comparando as parcelas adjacentes com a mesma posição na encosta, as parcelas com “mulching” produziam consistentemente menos escorrência e sedimentos que as parcelas não tratadas (Figura 11c, d). A eficácia do “mulching” na redução das quantidades totais de escorrência mantém-se sempre acima de 45%. Mas na redução das quantidades totais de sedimentos, apresenta valores muito mais destacados, estando sempre acima dos 67% (Figura 11e, f). No caso do PAM, comparando as parcelas adjacentes com a mesma posição na encosta, a produção de escorrência e sedimentos têm grande variabilidade. (Figura 11c, d). Neste tratamento a eficácia na redução das quantidades totais de escorrência é bastante variável apresentando apenas uma parcela com reduções importantes (51%), mantendo-se as restantes com reduções inferiores a 30%. Mas na redução das quantidades totais de sedimentos o PAM não foi efetivo, variando as reduções entre (-37 e 4%), (Figura 11e, f)



**Figura 11:** Variabilidade da escorrência e perda de sedimentos nas microparcelas ao longo da encosta.

#### 2.4.4 FACTORES EXPLICATIVOS DA ESCORRÊNCIA E EROSÃO

A ANOVA de três vias mostrou que ambos os tratamentos afetam significativamente o comportamento à escala da microparcela (Tabela 2). Portanto, a escorrência (mm e %), diminuiu significativamente com a aplicação de ambos os tratamentos (56 e 20% para o “mulching” e o PAM, respectivamente, ver 2.4.1 Tabela 1). A perda de sedimentos foi significativamente menor no caso do “mulching” (88%) mas significativamente maior no caso do PAM (+24%, ver 2.4.1 Tabela 1). A percentagem de matéria orgânica nos sedimentos também foi significativamente diferente em ambos os tratamentos.

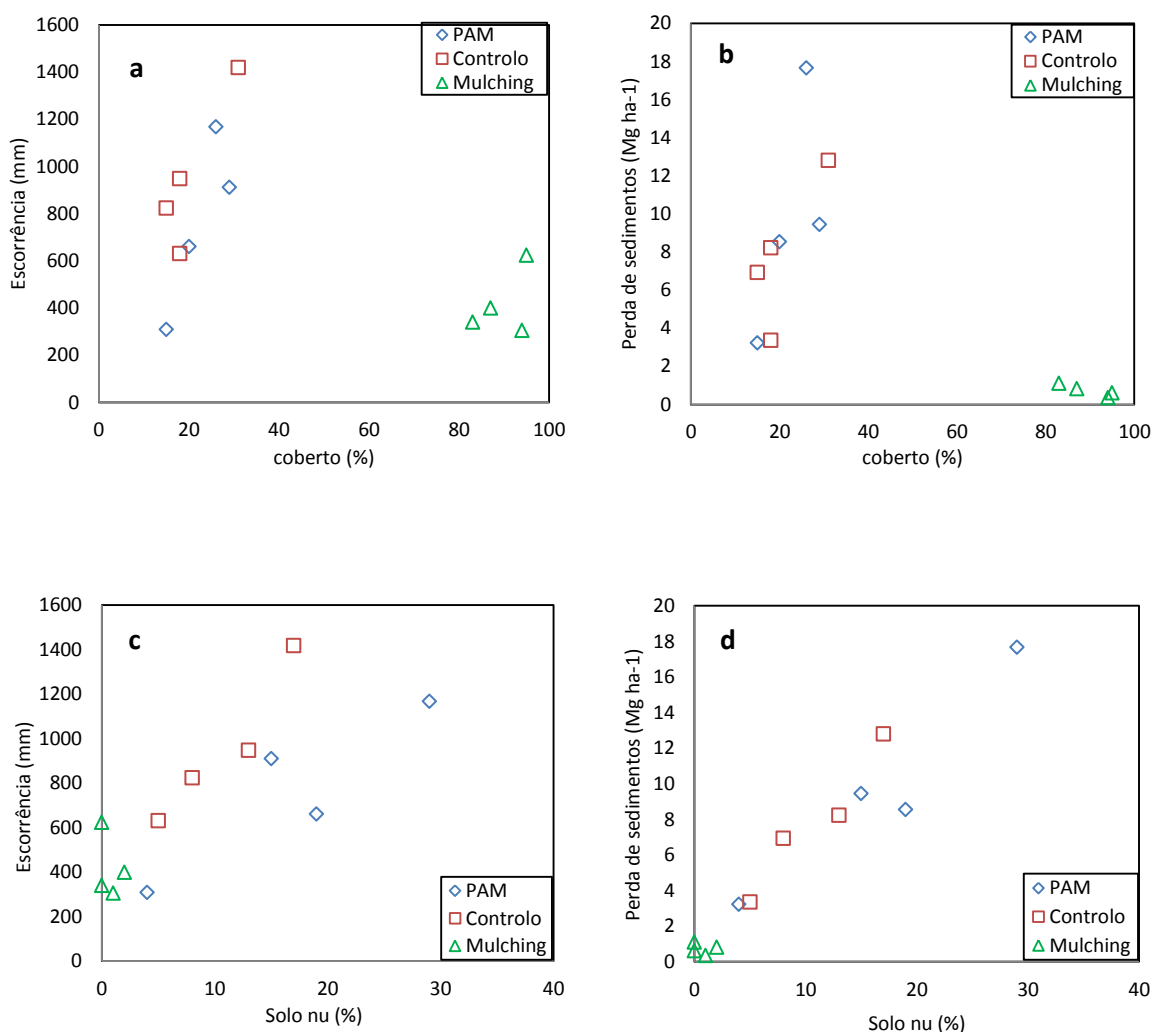
O fator tempo influenciou significativamente a escorrência (mm e %) em ambos os tratamentos mas não a perda de sedimentos ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) no PAM e a matéria orgânica (%) no “mulching”. A posição na encosta (bloco) revelou-se como um factor preponderante, influenciando significativamente a todas as variáveis e tratamentos.

À escala de encosta, através da ANOVA de duas vias verifica-se que o efeito do tratamento continua a ser significativo para a escorrência (mm e %) e para as perdas de sedimentos ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), mas não para a percentagem de matéria orgânica. O tempo afeta significativamente todas as variáveis dependentes, e o efeito da interação “tratamento x tempo” foi significativo na perda de sedimentos. Este último resultado indica que o tratamento com “mulching” na escala da encosta não foi efetivo na sua totalidade, mas sim para alguns dos períodos.

**Tabela 2:** Resultados de análises de variâncias (ANOVA) de duas vias para amostras repetidas de escorrência, coeficiente de escorrência e perda de sedimentos e matéria orgânica.

3-WAY ANOVA	<u>"Mulching"</u>				<u>PAM</u>			
	n	tratamento	tempo	bloco	n	tratamento	tempo	bloco
<b>Escala de microparcela</b>								
Escorrência (mm)	29	<0,05	<0,05	<0,05	29	<0,05	<0,05	<0,05
Coef. de escorrência (%)	29	<0,05	<0,05	<0,05	29	<0,05	<0,05	<0,05
Perda de sedimentos ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	18	<0,05	<0,05	<0,05	21	<0,05	0,257	<0,05
Conteúdo de m. orgânica (%)	18	<0,05	0,417	<0,05	21	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Escala de Encosta</b>								
2-WAY ANOVA	n	tratamento	tempo	tratamento x tempo	-	-	-	-
Escorrência (mm)	31	<0,05	<0,05	0,089	-	-	-	-
Coef. de escorrência (%)	31	<0,05	<0,05	0,089	-	-	-	-
Perda de sedimentos ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	24	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-
Conteúdo de m. orgânica (%)	23	0,038	<0,05	0,902	-	-	-	-

Quanto à percentagem de coberto do solo médio, as microparcelas com “mulching” (coberto maior que 80%) apresentam menores escorrências, perdas de sedimentos e entre elas pouca variabilidade, enquanto que as microparcelas de controlo e PAM (coberto menor que 40%) possuem maiores quantidades e entre elas maior variabilidade (Figura 12a,b). Examinando as categorias de solo em separado, a percentagem de solo nu relacionou-se mais estreitamente com a escorrência e produção de sedimentos do que com as outras variáveis (Figura 12c,d). De facto a percentagem de solo nu foi maior nas microparcelas da base da encosta do que no topo da encosta.



**Figura 12:** Relação dos valores totais de escorrência e perda de sedimentos nos quatro blocos de microparcelas na encosta com os parâmetros: coberto (%) e Solo nu (%).

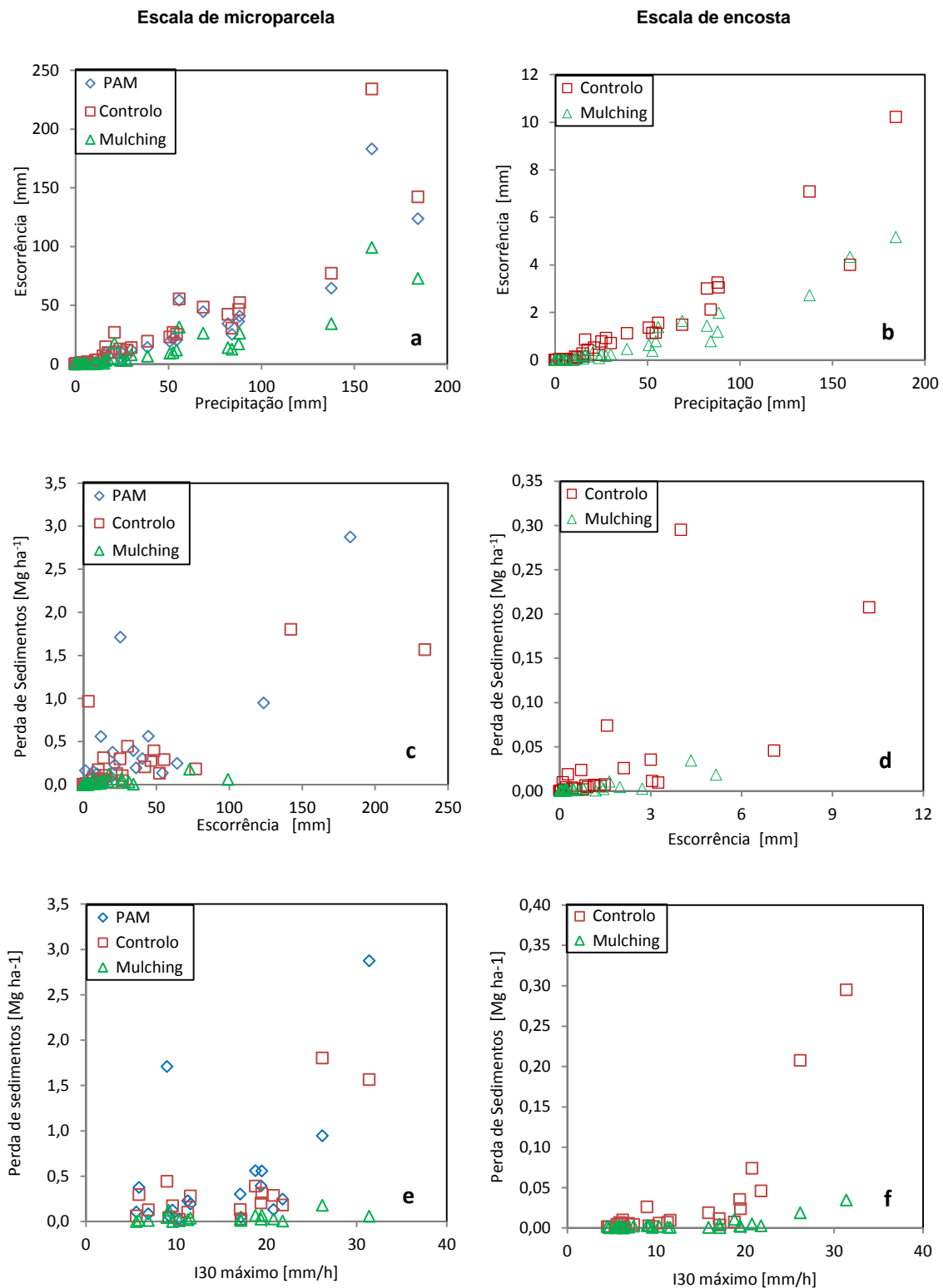
A precipitação semanal é a variável que melhor se relaciona nas parcelas de controlo com a escorrência (Coeficiente de correlação de Spearman  $r=0,96$  na escala de microparcela e  $r=0,97$  na escala de encosta, tabela 3). Para as perdas de sedimentos os resultados foram diferentes, apresentando uma melhor relação com a precipitação no controlo da escala de microparcela ( $r=0,88$ ) e uma melhor relação com intensidade em 30 minutos no controlo da escala de encosta ( $r=0,92$ ) (Figura 13a,b,c,d,e,f; Tabela 3).

Nos tratamentos a escorrência tem também a melhor relação com a precipitação semanal ( $r=0,95$  para “mulching” e  $r=0,98$  para o PAM na escala de microparcela e  $r=0,96$  para o “mulching” na escala de encosta; Figura 13a,b).

A escorrência e a perda de sedimentos estão estritamente relacionadas tanto nos controlos (escala de microparcela  $r=0,88$  e escala de encosta  $r=0,93$ ) como nos tratamentos. Nota-se que existe um efeito de limitação da perda de sedimentos nas parcelas com “mulching” em ambas as escalas, o que não acontece nas parcelas de controlo e PAM, em que o aumento da escorrência é acompanhado pelo aumento da produção de sedimentos (Figura 13c,d).

A intensidade máxima em 30 minutos revelou-se menos importante na produção de sedimentos (Coeficiente de correlação de Spearman  $r=0,87$  ainda que significativo) do que as variáveis escorrência ( $r=0,89$ ) e precipitação ( $r=0,88$ ), no controlo da escala de microparcela. Já no controlo da escala de encosta apenas a escorrência ( $r=0,93$ ) se sobrepõe à intensidade em 30 minutos ( $r=0,92$ ) na produção de sedimentos. Os períodos menos intensos não apresentam variação na produção de sedimentos, mas nota-se que a partir de uma intensidade de aproximadamente  $20 \text{ mm h}^{-1}$ , a produção de sedimentos aumenta (Figura 13e,f). Somente as parcelas com “mulching” parecem não ser afectadas por este aumento da intensidade.

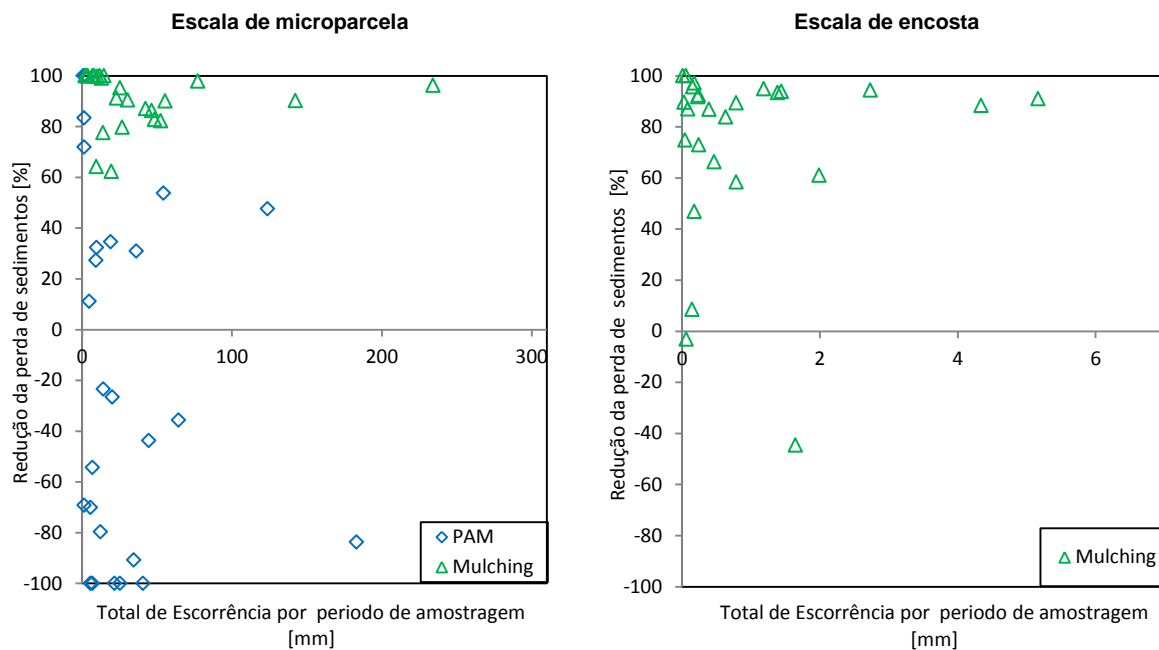
Olhando para a redução das perdas de sedimentos dos dois tratamentos em cada período de amostragem em relação à quantidade de escorrência gerada (Figura 14), verificamos que o “mulching” foi efetivo nas duas escalas, principalmente para as grandes quantidades de escorrência e que o tratamento com PAM não foi efetivo. Para a escala de microparcela o “mulching” apresenta uma efetividade mínima de 60%, já o PAM apenas em quatro períodos apresentou uma efetividade superior a 50%. Na escala de encosta, à exceção de três períodos, o “mulching”, apresenta uma efetividade mínima de 45%.



**Figura 13:** Relação entre as variáveis Precipitação, escorrência, Perda de Sedimentos e Intensidade máxima da chuva medida em cada uma das observações.

**Tabela 3:** Coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros Precipitação, Intensidade máxima da chuva e escorrência medida em cada uma das observações.

Coeficientes de correlação de Spearman (r)			Precipitação	I30	Escorrência
Escala de microparcela	Controlo	Escorrência	0,963	0,918	1,000
		P. sedimentos	0,880	0,869	0,885
	"Mulching"	Escorrência	0,946	0,916	1,000
		P. sedimentos	0,798	0,769	0,862
	PAM	Escorrência	0,976	0,929	1,000
		P. sedimentos	0,886	0,865	0,891
Escala de encosta	Controlo	Escorrência	0,971	0,914	1,000
		P. sedimentos	0,914	0,921	0,933
	"Mulching"	Escorrência	0,963	0,925	1,000
		P. sedimentos	0,905	0,850	0,932



**Figura 14:** Efetividade dos tratamentos em relação à escorrência medida em cada uma das observações na escala de microparcela e escala de encosta.



## 2.5 DISCUSSÃO

No primeiro ano após o incêndio o “mulching” apresenta reduções nas perdas de sedimentos na ordem dos 90% e 87% (escala de microparcela e escala de encosta respectivamente). Estes valores são similares aos 86% encontrados por Prats *et al.*, (2012) num eucaliptal ardido próximo (2km) ao deste estudo, mas com uma menor taxa de aplicação de “mulching” (8,7 Mg ha<sup>-1</sup> contra 13,6 Mg ha<sup>-1</sup>). Outro estudo próximo desta região, também num eucaliptal ardido, Shakesby *et al.*, (1996) obteve valores semelhantes (91%) com uma taxa de aplicação 46 Mg ha<sup>-1</sup>, mas o tratamento apenas foi aplicado um ano após o incêndio. Em relação à escorrência no presente estudo as parcelas com “mulching” apresentam uma redução de 55% e 47% na escala de microparcela e escala de encosta respectivamente. Estas taxas são superiores às encontradas por Prats *et al.*, (2012) e Shakesby *et al.*, (1996) que obtiveram reduções de 41% e 3% respectivamente, em parcelas de 16m<sup>2</sup>.

No mesmo período, o tratamento com PAM não foi efetivo, apresentando um aumento de 23% nas perdas de sedimentos. A quase inexistência de estudos com este tipo de tratamento em solos após incêndio torna difícil a comparação destes resultados, no entanto um estudo com aplicação de poliacilamidas na região de Colorado Front Range (EUA), MacDonald *et al.*, (2009) afirma não encontrar evidências de que o PAM reduza a produção de sedimentos em áreas ardidas. Depois destes resultados, o mesmo autor afirma que testes efectuados em laboratório concluíram que o PAM em cobertos superiores a 60% de cinzas liga-se facilmente a estas reduzindo as suas ligações com o solo. Somando a este facto, Sojka *et al.*, (2007) afirma que em solos com a estrutura degradada (como é o caso de solos depois de incêndios) e em solos franco arenosos (o que coincide com o solo deste estudo) o PAM tem uma tendência a aumentar a viscosidade de infiltração da água, reduzindo assim as taxas de infiltração no solo. Relativamente às taxas de escorrência o PAM apresenta uma redução de 20%, bastante longe de reduções superiores a 60% reportados por Ben-Hur, (2006) num estudo com aplicação de poliacrilamidas em sistemas de irrigação agrícola sem as interferências das cinzas.

Este estudo mostra claramente que a escorrência e as perdas de sedimentos encontrados na escala de microparcela são uma ordem de grandeza superior aos encontrados na escala de encosta. O mesmo se sucede para o coeficiente de escorrência médio que nas microparcelas é da ordem de 46%, 33% e 22% para controlo, PAM e “mulching”, respectivamente, valores bastante superiores às parcelas da escala

de encosta que apresentam 1,2% e 2,5%, para o “mulching” e controlo. Num estudo realizado no centro de Portugal, para uma escala intermédia às deste estudo (16 m<sup>2</sup>), Coelho *et al.*, (2004) obteve um coeficiente de escorrência de 11,6% para um pinhal ardido. Usando a mesma escala (16m<sup>2</sup>) Shakesby *et al.*, (1996) e Prats *et al.*, (2012) obtiveram em eucaliptais ardidos 20% e 26% respectivamente. Estes valores ficam no meio dos encontrados pelo presente estudo entre escalas inferiores (0,25m<sup>2</sup>) e escalas superiores (100m<sup>2</sup>). Nas perdas de sedimentos, Shakesby *et al.*, (1996) encontrou 4,9 Mg ha<sup>-1</sup> no segundo ano após o incêndio e Prats *et al.*, (2012) 5,4 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano após incêndio. Estes resultados ficam novamente entre os encontrados nas duas escalas estudadas do presente estudo, e reforçam a ideia de que com o aumento da escala de monitorização, os valores obtidos vão diminuindo.

É evidente que a variabilidade espacial proporcionada pela diferença de tamanhos entre as escalas tem um papel importante na magnitude dos resultados, como referido em Ferreira *et al.*, (2008). Estas diferenças podem ser explicadas pela maior distância que a escorrência tem de percorrer na escala de encosta. Neste percurso pode ficar retida em descontinuidades do solo, na vegetação, passar por zonas de maior capacidade de infiltração ou macroporos (Coelho *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2009). Esta variabilidade espacial na geração de escorrência dentro de uma encosta não se manifesta na escala de microparcela devido ao reduzido tamanho da parcela, levando a uma resposta hidrológica e erosiva mais rápida (Boix-Fayos *et al.*, 2006).

Neste estudo verificou-se que oito meses após a aplicação dos tratamentos, a diferença da percentagem de solo coberto entre as parcelas com “mulching” e as parcelas de controlo e PAM está a diminuir com o tempo, sendo atribuída esta aproximação ao restabelecimento de nova vegetação e o surgimento de novas pedras. Badía *et al.*, (2000) num estudo realizado no vale do Ebro em Espanha com tratamento de palha de cevada, encontrou este efeito no segundo ano após o incêndio, mantendo-se o coberto de “mulching” aproximadamente constante durante o primeiro ano de aplicação, degradando-se no segundo ano entre 15 a 31%. Wagenbrenner *et al.*, (2006) e Fernandez *et al.*, (2011) em estudos semelhantes (Estados Unidos e Espanha respectivamente), observaram uma diminuição do “mulching” de palha de 13% e 10% até nove meses após o tratamento. Os primeiros autores sugerem que o declínio na percentagem de “mulching” se deve à sua decomposição e também à sua remoção do solo pela escorrência, e que, o “mulching” será gradualmente substituído pela nova vegetação. No presente estudo não verificamos a remoção do “mulching” pela escorrência atribuindo a sua diminuição é degradação biológica do mesmo.

Paralelamente a este declínio, as parcelas controlo e PAM, que não apresentam diferenças no seu coberto, aumentam a sua percentagem de coberto do solo, não só pelo restabelecimento de nova vegetação, mas em parte devido à lavagem das cinzas que deixam a descoberto novas pedras. Shakesby, (2011) refere que nos solos mediterrânicos, por geralmente terem camadas finas e muito pedregosas, as cinzas são rapidamente removidas pela escorrência, passando o solo a deter uma camada protetora de pedras. No presente estudo, ao fim de nove meses ainda existem cerca de 40-50% de cinzas, não se verificando o aumento de pedras nas parcelas controlo da escala de encosta, sendo justificado o aumento de coberto com a nova vegetação. Na escala de microparcela nota-se o aumento de pedras, mas em parte porque nestas parcelas foram removidos os ramos de eucaliptos jovens, portanto a observação corresponde apenas a pequenas plantas e arbustos, alterando os resultados.

Nos primeiros cinco meses após o incêndio as perdas de sedimentos foram máximas (60% e 80% do primeiro ano de monitorização na escala de microparcela e escala de encosta respectivamente), o que corresponde ao período de maior precipitação (763 mm). Fernandez *et al.*, (2011) reporta mais de 50% das perdas de sedimentos para o primeiro ano nos primeiros três meses após o incêndio que coincidiram com os maiores registos de precipitação. Shakesby *et al.*, (2006) acunhou a frase “janela de perturbação” para se referir a este período de aumento de erosão imediatamente e durante o período de 1-2 anos após o incêndio, mas em trabalhos posteriores Shakesby, (2011) indicou que tal período se pode alongar entre 3-10 anos, dependendo do regime pluviométrico anual. Este trabalho coincide plenamente com tal “janela de perturbação”, mas seria preciso verificar o que ocorre no segundo e terceiro ano para afirmar que a escorrência e a erosão decaem depois de 1-2 anos.

A evolução temporal do coeficiente de escorrência e das taxas de perdas de sedimentos são difíceis de explicar, pois raramente existem estudos com a sua evolução temporal, no entanto Malvar *et al.*, (2010) num estudo de simulações de chuva em áreas ardidas no centro Norte de Portugal usando uma escala de 0,25m<sup>2</sup> encontrou também uma tendência decrescente no coeficiente de escorrência, mas com valores mais baixos que os entrados nos controlos da escala de microparcela do presente estudo, apresentando Malvar *et al.*, (2010) uma média de 75% no Outono após o incêndio, 25% na primavera e 5% no verão.

No mesmo estudo, Malvar *et al.*, (2010) encontrou entre 0,001 e 0,002 Mg ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup> para as taxas de perda de sedimentos no Outono após o incêndio, valor bastante inferior ao

encontrado no presente estudo ( $0,009 \text{ Mg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ ) nas parcelas de controlo da escala de microparcela para a mesma estação do ano. Para a primavera o mesmo estudo encontrou os valores mais elevados, tal como neste estudo para as parcelas de controlo da escala de microparcela, mas novamente com uma ordem de grandeza inferior ( $0,003$  contra  $0,081 \text{ Mg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ ). Esta diferença no coeficiente de escorrência e na taxa de perda de sedimentos pode ser explicada pela grande variabilidade de efeitos que um estudo em condições de campo sofre em contínuo, quando comparando com os resultados obtidos numa simulação de chuva.

Os resultados demonstram que para as microparcelas de controlo e PAM à medida que subimos a encosta a geração de escorrência e as perdas de sedimentos diminuem. Não foram encontradas diferenças na geologia, textura ou densidade solo entre os vários pontos da encosta estudados, mas a escorrência e a produção de sedimentos neste caso têm uma boa relação com quantidade de solo nu, o que pode indicar que houve uma maior intensidade do incêndio na base da encosta que no topo. Por sua vez, esta maior intensidade pode estar promovida por uma maior carga combustível antes do incêndio (mais vegetação) perto da linha de água do que no topo da encosta.

Esta variação também pode dever-se a uma maior humidade do solo na base da encosta, que leva a um maior crescimento da vegetação antes do incêndio, e após o incêndio, a uma saturação mais rápida do solo, gerando maiores quantidades de escorrência na base que no topo da encosta. Ao mesmo tempo verifica-se que as parcelas com “mulching” não sofrem variações nas taxas de escorrência e erosão com a posição na encosta. Este facto deve-se claramente ao efeito do coberto. Como demonstra este estudo, em ambas as escalas as parcelas de “mulching” (coberto maior que 80%) obtiveram as menores taxas de escorrência e perdas de sedimentos, pelo que assumimos que o coberto é o factor dominante.

No global, a quantidade de precipitação aparece como a variável melhor correlacionada com a erosão, dado que a escorrência depende diretamente da precipitação. A mesma tendência foi encontrada em clima Atlântico-Mediterrâneo por Fernandez *et al.*, (2011) e Prats *et al.*, (2012), enquanto Wagenbrenner *et al.*, (2006) no Colorado (Estados Unidos) reporta a intensidade da chuva como a melhor relação. Estes resultados contraditórios são apontados por Fernandez *et al.*, (2011) como uma consequência das diferenças do clima, onde no Atlântico os períodos de precipitação são mais longos e menos intensos.

A importância do coberto do solo é confirmada por vários estudos após incêndio florestal (Bautista *et al.*, 1996; Badía *et al.*, 2000; Wagenbrenner *et al.*, 2006; MacDonald *et al.*,

2009; Fernandez *et al.*, 2011) incluindo alguns em Portugal (Shakesby, 1996; Prats *et al.*, 2012). Nos eventos de maior escorrência, que são os mais críticos para as perdas de sedimentos, o tratamento com “mulching” (80% de coberto) foi efetivo, nos pequenos eventos a efetividade diminui mas mantém-se acima dos 45%, este facto pode revelar uma vantagem da casca de eucalipto em relação ao “mulching” de palha onde segundo Wagenbrenner *et al.*, (2006) o “mulching” não foi efetivo para eventos muito pequenos e muito intensos.

MacDonald *et al.*, (2009) justifica a efetividade do “mulching” em tratamentos de estabilização do solo após incêndio pela proteção que este oferece das gotas da chuva e por retardar a compactação e impermeabilização do solo, este efeito pode justificar a baixa disponibilidade de sedimentos existente nas parcelas com “mulching”.

## 2.6 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo, após avaliar a efetividade de dois tratamentos (“mulching” de resíduos de eucalipto e poliacrilamidas aniónicas) na redução do escoamento superficial e erosão do solo num eucaliptal recentemente ardido no centro norte de Portugal foram as seguintes:

- 1- O “mulching” de casca de eucalipto reduz amplamente a escorrência e as perdas de sedimentos em ambas as escalas (0,24m<sup>2</sup> e 100m<sup>2</sup>).
- 2- O PAM (apenas testado na escala de microparcela) não reduz as perdas de sedimentos, mas reduziu ligeiramente a escorrência (10%).
- 3- A escorrência e as perdas de sedimentos apresentam resultados muito diferentes dependendo da escala que estamos a usar (maior na escala de microparcela, uma ordem de grandeza menor na escala de encosta).
- 4- O coberto do solo (80%) é um factor determinante na redução da escorrência e perdas de sedimentos.
- 5- O aumento da escorrência e das perdas de sedimentos à medida que se desce na posição da encosta pode mascarar uma série de processos encadeados. Um melhor entendimento das diferenças da intensidade do incêndio e da humidade do solo desde a base até ao topo da encosta pode clarificar este resultado.
- 6- Na globalidade do estudo a precipitação é a variável que melhor se correlaciona com as perdas de sedimentos, mas para os eventos de maior intensidade de precipitação a intensidade torna-se igualmente um factor importante.

### **CAPÍTULO 3 – VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS E CONCLUSÕES DA TESE**

Após verificada a efetividade dos tratamentos de estabilização ao solo após fogo com “mulching” derivado de casca de eucalipto e aplicação de PAM (não efetivo), surge a necessidade de averiguar se valerá a pena aplicar estes tratamentos de futuro.

Com o recente início em Portugal de intervenções de estabilização do solo após incêndios florestais preconizados na portaria 1137-B/2008 surge primeiramente a necessidade de criar mecanismos de detecção de áreas prioritárias a receber estes tratamentos, uma vez que seria difícil intervir em todas as áreas ardidas devido ao elevado seu elevado numero.

Alguns autores sugerem que mapas da intensidade do incêndio são os mais indicados para selecionar as áreas prioritárias a receber tratamento, uma vez que o aumento da severidade do incêndio tem apresentado associações com o aumento da erosão (Robichaud *et al.*, 2010). Para este efeito sugere-se a criação e desenvolvimento de uma ferramenta de mapeamento da severidade dos incêndios em Portugal por controlo remoto, uma vez que as elevadas áreas afectadas todos os anos tornariam impossível a classificação “in situ” da severidade para todos os incêndios. Paralelamente, deve-se proceder a uma análise de custo benefício do tratamento. Esta deverá ter em conta o peso dos principais valores em risco (habitats, segurança e saúde publica) em função dos custos do tratamento, de modo a se efetuar a melhor gestão possível dos fundos atribuídos para tratamentos.

Após uma adequada seleção das áreas prioritária a receber tratamento e olhando para os resultados apresentados no capítulo 2 deste documento, pode-se afirmar que o “mulching” derivado de resíduos de eucalipto terá elevada probabilidade de proteger o solo contra a erosão hídrica. No entanto, como referido no capítulo 2, em trabalhos anteriores para o mesmo tipo de “mulching” Prats *et al.*, (2012) obteve efetividade com uma menor taxa de aplicação ( $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  contra  $13,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Esta diferença de  $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  ao custo de  $30 \text{ € Mg}^{-1}$  (SÓCASCAS,SA) representa  $147 \text{ € ha}^{-1}$ , revelando a importância da taxa de “mulching” a aplicar de modo a maximizar o custo benefício do tratamento.

Neste documento, o capítulo 2 revela que o tratamento de estabilização do solo após incêndio florestal com PAM por si só não é efetivo na redução da erosão hídrica, no entanto obteve-se uma redução de escorrência superficial de 20%. Em estudos recentes

o PAM tem sido testado em combinação com o tratamento de “mulching” e obtiveram-se melhores efetividades na sua combinação que o “mulching” por si só (McLaughlin *et al.*, 2009). Uma vez que o PAM é muito mais barato que o “mulching”, tendo por base as taxas aplicadas neste estudo (200 € ha<sup>-1</sup> contra 406 € ha<sup>-1</sup>), sugere-se para trabalhos futuros a verificação da efetividade da combinação destes dois tratamentos na redução de escorrência e erosão após incêndio florestal, utilizando uma menor taxa de “mulching”.

Como comentário final, espera-se com este estudo reforçar o conhecimento da aplicação de tratamentos de estabilização ao solo após incêndios florestais e ajudar os decisores a tomar as melhores escolhas nas ações de gestão após incêndios.

## Referências Bibliográficas

- AFN (Autoridade Florestal Nacional), 2010. Relatório Anual De Áreas Ardidas e Ocorrências.
- Badía, D., Marti, C., 2000. Seeding and “mulching” treatments as conservation measures of two burned soils in the central Ebro valley, NE Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 13, 219–232.
- Bautista, S., Bellot, J., Vallejo, V.R., 1996. “mulching” treatment for post-fire soil conservation in a semiarid ecosystem. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 10, 235–242.
- Bautista, S., Robichaud, P.R., Bladé, C. 2009. Post-fire mulching. In: Cerdà, A.; Robichaud, P.R., eds. *Fire effects on soils and restoration strategies*. Enfield, NH: Science Publishers, 353-372.
- Ben-Hur, M., 2006. Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid regions – A review. *Australian Journal of Soil Research* 44, 191-204.
- Benavides-Solorio, J.; MacDonald, L.H. 2005. Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. *International Journal of Wildland Fire*. 14, 457-474.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Calvo-Caeses, A., Arnau-Rosalén, E., Albaladejo J., Castillo, V., 2007. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surf. Process. and Landforms* 32, 85-101.
- Brooks M., 2005. Effectiveness of Postfire Seeding to Reduce Cheatgrass (*Bromus tectorum*) Growth and Reproduction in Recently Burned Sagebrush Steppe. Visto em 9 de Novembro de 2011, do:  
<http://www.werc.usgs.gov/OLDsitedata/fire/lv/postfireseeding/greatbasin/objectives.htm>
- Cerdà, A., García-Fayos P., 1996. The influence of slope angle on sediment, water and losses on badland landscapes. *Geomorphology* 18, 77-90.
- Coelho, C.O.A., Ferreira, A.J.D., Boulet, A.K., Keizer, J.J., 2004. Overland flow generation processes, erosion yields and solute loss following different intensity fires. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37, 233–240.
- Davidson, R.A., Davidson, C.F., Roa-Espinosa, A. 2009. Linearanionic polyacrylamide as an effective post-fire soil treatment: understanding the chemistry and physical science. *Journal of Soiland Water Conservation*. 64, 243-252.



DGRF (Direção Geral de Recursos Florestais), 2006. Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios. Lisboa Portugal

Doerr, S.H.; Shakesby, R.A.; Blake, W.H.; Chafer, C.J.; Humphreys, G.S.; Walbrink, P.J. 2006. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*. 319, 295-311.

DRA-Centro (Direcção Regional do Ambiente do Centro), 1998. Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga, 1ª fase, Análise e diagnóstico da situação de referência. Análise biofísica, Anexos. Lisboa Portugal

Fernandes, I.A.C., Nunes, J.P., Ferreira, R.S.V., Pereira, L.M.G.P., Vieira, D.C.S., Keizer, J.J., 2010. Escorrência e erosão a múltiplas escalas espaciais numa área florestal mista recentemente ardida no centro norte de Portugal. *Territorium*, 17.

Fernandez, C., Veja, J. A., Jiménez, E., Fonturbel, T., 2011. Effectiveness of Three Post-Fire Treatments at Reducing Soil Erosion in Galicia (NW Spain). *International Journal of Wildland Fire* 20, 104-114.

Ferreira, A.J.D, Coelho, C.O.A., Boulet, A.K, Lopes, F.P., 2005. Temporal patterns of solute loss following wildfires in Central Portugal. *International Journal of Wildland Fire* 14, 401–412.

Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Ritsema, C.J., Boulet, A.K., Keizer, J.J., 2008. Soil and water degradation processes in burned areas: lessons learned from a nested approach. *Catena* 74, 273–285.

Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Silva, J.S., Boulet, A.K., Keizer, J.J., 2009. Portuguese Experience Managing Fire Effects. *Fire Effects on soils and restoration strategies* Cerdà A and Robichaud P (eds), *Land Reconstruction and Management*, vol. 5, Science Publishers, 401 – 424.

Keizer, J.J., Doerr, S.H., Malvar, M.C., Prats, S.A., Ferreira, R.S.V., Oñate, M.G., Coelho, C.O.A., Ferreira, A.J.D., 2008. Temporal variation in topsoil water repellency in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. *Catena* 74, 192–204.

Lentz, R.D., Sojka, R.E., 2000. Applying polymers to irrigation water: evaluating strategies for furrow erosion control. *Transactions of the ASAE*. 43, 1561-1568.

Lightfoot, D.R., 1997. The Nature, History, and Distribution of Lithic Mulch Agriculture: Na Ancient Technique of Dryland Agriculture. *The Agricultural History Review*, 44(2), 206-222.

- MacDonald, H.L., Larsen, I.J., 2009. Effects of Forest Fires and Post-Fire Rehabilitation: A Colorado Case Study. In: Cerda, A. and Robichaud P. (eds.), Restoration Strategies after Forest Fires, Science Publishers, Inc, Enfield, New Hampshire, USA. 423-452
- Malvar, M.C., Prats, S.A., Nunes, J.P., Keizer, J.J., 2011. Post fire overland flow generation and inter rill erosion under simulated rainfall in two eucalypt stands in north-central Portugal. Environmental Research 111, 222–236.
- McLaughlin, R.A., Brown, T.T. 2006. Performance of erosion control materials and polyacrylamide under field and rainfall simulator conditions. Journal of the American Water Resource Association. 42(3), 675-684.
- Miles, S.R., Haskins, D.M., Ranken D.W., 1989. Emergency Burn Rehabilitation: Cost, Risk, and Effectiveness. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-109.
- Napper, C. 2006. The burned area emergency response treatment catalog (BAERCAT). Tech. Rep. 0625 1801-SDTDC. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, National Technology & Development Program, Watershed, Soil, Air Management. 253 p.
- Neary, Daniel G.; Ryan, Kevin C.; DeBano, Leonard F., 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS GTR-42-vol. 4. Odgen, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p.
- Portaria n.º 1137-B/2008*, de 9 de Outubro, do Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas.
- Prats, S. A., MacDonald, L.H., Monteiro, M. S. V., Ferreira, A. J. D., Coelho, C.O.A., Keizer, J.J., (under review). Effectiveness of forest residue “mulching” in reducing post-fire runoff and erosion in a pine and a eucalypt plantation in north-central Portugal.
- Riechers, G.H., Beyers, J.L., Robichaud, P.R., Jennings, K., Kreutz, E., Moll, J., 2008. Effects of three mulch treatments on initial post-fire erosion in North-Central Arizona. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-189. In: Narog, Marcia G. (Eds.) Proceedings of the 2002 fire conference: Managing fire and fuels in the remaining wildlands and open spaces of the Southwestern United States.
- Robichaud, P.R., Beyers, J.L., Neary, D.G. 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-63. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 85 p.

- Robichaud, P.R., Wagenbrenner, J.W., Brown, R.E., Wohlgemuth, P.M., and Beyers, J.L., 2008. Evaluating the effectiveness of contour-felled log erosion barriers as a post-fire runoff and erosion mitigation treatment in the Western United States. *International Journal of Wildland Fire* 17, 255-273.
- Robichaud, P.R., 2009. Post-fire stabilization and rehabilitation. In: Cerdà, A., Robichaud, P.R., eds. *Fire effects on soils and restoration strategies*. Enfield, NH: Science Publishers: 299-372.
- Robichaud, P.R., Ashmun, L.E., Sims B.D., 2010. Post-Fire Treatment Effectiveness for Hillslope Stabilization. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-240
- Scott, D.F., Curran, M.P., Robichaud, P.R., Wagenbrenner, J.W. 2009. Soil erosion after forest fire. In: Cerdà, A.; Robichaud, P.R., eds. *Fire effects on soils and restoration strategies*. Enfield, NH: Science Publishers: 178-195.
- Smets, T., Poesen, J., Knapen A., 2008. Spatial scale effects on the effectiveness of organic in reducing soil erosion by water. *Earth-Science Reviews* 89, 1-12
- Shakesby, R.A., Boakes, D.J., Coelho, C.O.A., Gonçalves, A.J.B., Walsh, R.P.D., 1996. Limiting the soil degradational impacts of wildfire in pine and eucalypt forests in Portugal. *Applied Geography* 16, 337–356.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H., Walsh, R.P.D., 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of Hydrology* 231–232, 178–191.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H., 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* 74, 269–307.
- Shakesby, R.A., 2011. Post-Wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews* 105, 71-100.
- Sojka, R.E., Bjorneberg, D.L., Entry, J.A., Lentz, R.D., Orts, W.J. 2007. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. *Advances in Agronomy*. 92, 75-162.
- Vacher, CA., R.J. Loch, and S.R. Raiste., 2003. Effect of polyacrylamide additions on infiltration and erosion of disturbed lands. *Australian journal of Soil Research* 41, 1509-1520.
- Wagenbrenner, J.W., MacDonald, L.H., Rough, D., 2006. Effectiveness of three post-fire rehabilitation treatments in the Colorado Front Range. *Hydrological Processes* 20, 2989–3006.

WRB (world references base for soil resources), (2006). World Soil Resources Reports Nº. 103, 2ª edição. FAO, Rome.